

Überholverhalten auf 2+1-Strecken

Ein Beitrag zur Gestaltung von dreistreifigen Landstraßen

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Marco Irzik
geboren am 07.06.1974
aus Köln

Eingereicht am	02. Juni 2008
Disputation am	04. Dezember 2008

Berichterstatter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Brannolte
------------------	--

2009

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde von mir in den Jahren 2006 bis 2008 erstellt. Die Grundlage dafür bildete das Forschungsprojekt „Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken“, das – unter der Projektleitung meines damaligen Chefs am IVH, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich und gemeinsam mit meiner Lieben Kollegin Frau Dr.-Ing. Wiebke Dammann – von mir bearbeitet wurde. Mein erster Dank gilt daher diesen beiden Personen. Ich möchte es jedoch nicht versäumen, mich auch bei den zahlreichen Hiwis und Studenten zu bedanken, die durch ihr Mitwirken zum Gelingen des Forschungsprojekts und somit auch der Dissertation beigetragen haben.

Die Bearbeitung des Forschungsprojekts erfolgte im Auftrag der BAST, meinem heutigen Arbeitgeber. Somit schließt sich der Kreis und ich kann meinem derzeitigen Chef, Herrn Dr.-Ing. Roland Weber, nicht nur für die Fachbetreuung des Forschungsprojekts danken, sondern auch für die hilfreichen Hinweise bei der Erstellung der Dissertation. Letzteres gilt auch für meine übrigen neuen Kollegen. Insbesondere möchte ich daher Herrn Dr. Andreas Schepers für die Hilfestellungen zu den Fragen der Statistik danken.

Zum wiederholten Male geht mein Dank an Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich. Ich bedanke mich an dieser Stelle recht herzlich für die Betreuung der Dissertation sowie für die Übernahme des Hauptberichts. In gleicher Weise danken möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Brannolte für die Übernahme des Koreferats.

Meiner Familie möchte ich für ihre Unterstützung danken. Insbesondere gebührt mein Dank meiner Frau Melanie für ihr Verständnis und ihre Nachsicht.

Auf die Frage meines Sohnes Ole kurz vor der Disputation, warum man denn Doktor-Ingenieur werden will, hatte ich ad hoc keine für einen fast 6-jährigen schlüssige Erklärung parat. Heute kann ich sagen, „weil es mir Spaß gemacht hat.“ Zur Erinnerung daran, dass man mit „Spaß an der Sache“ eine Menge erreichen kann, widme ich diese Arbeit meinen beiden Söhnen Ole und Sverre.

Kurzfassung

In den vergangenen Jahren wurden mehrere Forschungsarbeiten durchgeführt, die sich mit der Verkehrssicherheit und der Untersuchung des Verkehrsablaufs auf 2+1-Strecken beschäftigten. Umfassende Erkenntnisse über das Überholverhalten und die Pulkauflösung in Abhängigkeit von entwurfstechnischen und verkehrlichen Randbedingungen lagen bisher nicht bzw. nur auf Basis modelltechnischer Überlegungen vor. Das vorrangige Ziel der vorliegenden Dissertation bestand daher in der Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der optimalen Abschnittslänge von Überholabschnitten von 2+1-Strecken auf der Basis von empirischen Untersuchungen. Die besondere Problematik liegt dabei in der Lösung eines Zielkonflikts: Zum einem soll ein Überholabschnitt so bemessen sein, dass möglichst alle in den zweistreifigen Abschnitt einfahrenden Pulks an dessen Ende aufgelöst sind. Zum anderen darf der Überholabschnitt jedoch auch nicht zu lang sein, da sich dies unmittelbar auf die Länge des einstreifigen Abschnitts der Gegenrichtung und somit auf die Pulkbildung auswirkt. Neben der Dimensionierung des Überholabschnitts auf Basis der Pulkauflösung wurden auch Aspekte der Verkehrssicherheit in die Untersuchung einbezogen.

In einem ersten Arbeitsschritt wurde zunächst der aktuelle Wissensstand im Hinblick auf die zu bearbeitende Thematik zusammenfassend dargestellt. Nachdem die Auswahl der Untersuchungsabschnitte beschrieben wurde, wurden die relevanten Kenngrößen des Verkehrsablaufs, des Überholhaltens sowie der Pulkbildung und -auflösung vorgestellt. Im Anschluss an die Beschreibung der entwickelten und angewendeten Untersuchungsmethodik für die Durchführung der empirischen Untersuchungen wurde das Vorgehen und die dabei verwendeten Verfahren bei der Analyse der empirisch gewonnen Daten aufgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden i.d.R. statistisch aufbereitet dargestellt, und ggf. mit Ergebnissen zurückliegender Untersuchungen abgeglichen. Neben einer Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens, des Überholhaltens (hierbei insbesondere des Ein- und Ausscherhaltens) sowie der Pulkbildung im Vorfeld sowie im Zuge von 2+1-Strecken wurden auch verschiedene Ansätze zur Bestimmung einer zur Pulkauflösung erforderlichen Länge von Überholabschnitten auf 2+1-Strecken betrachtet.

Als wesentlichen Beitrag zum Erkenntnisfortschritt konnte im Rahmen dieser Arbeit ein praxisorientiertes Verfahren zur Ermittlung der optimalen Länge eines Überholabschnitts im Zuge von 2+1-Strecken erarbeitet werden. Im Gegensatz zu dem aus der Literatur bekannten Verfahren von Roos (1989) zur Ermittlung einer im Hinblick auf die Pulkauflösung erforderlichen Länge enthält das nachfolgend beschriebene Verfahren auch Empfehlungen hinsichtlich einer aus Sicherheitsüberlegungen abgeleiteten Mindestlänge sowie einer Obergrenze, um eine übermäßige Pulkbildung in der Gegenrichtung zu vermeiden. Das neu entwickelte Verfahren gründet sich dabei nicht auf modelltechnischen Überlegungen, sondern wurde auf Basis umfangreicher empirischer Untersuchungen sowie anhand von Korrelations- und Regressionsanalysen entwickelt. Zusammen mit dem durch BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) bzw. BASELAU (2006) entwickelten Verfahren zur Beurteilung der Verkehrsqualität auf Straßen mit 2+1-Verkehrsführung stehen dem Verkehrsplaner somit zwei hilfreiche Werkzeuge für die Planung von 2+1-Strecken zur Verfügung. Während das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren dabei der (Vor-) Planung dient, um die Abschnittslängen festzulegen, kann mit dem von BRANNOLTE, BASELAU

und DONG bzw. BASELAU erarbeiteten Verfahren die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs auf 2+1-Strecken erfolgen.

Neben dem neu entwickelten Verfahren zur Bestimmung der optimalen Länge eines Überholabschnitts enthält die vorgelegte Arbeit zusätzliche Hinweise zur Querschnittsgestaltung und Empfehlungen zur Knotenpunktart, die sich teilweise auf zurückliegenden Arbeiten gründen, jedoch auch im Rahmen der Dissertation auf der Grundlage vorhandener Untersuchungen erarbeitet wurden.

Abstract

Over the past few years there were some investigations into traffic safety and traffic flow on 2+1-routes in Germany. But the knowledge about the passing process and the dissolving of platoons – depending especially on the lengths of the two-lane sections – was still limited. Therefore the aim of the dissertation was to determine an optimal length for two-lane sections within 2+1-routes in dependence on various parameters. The length should be dimensioned so that platoons driving into a two-lane section will be dissolved. On the other hand it should not be longer than necessary, because if a two-lane section in one direction is too long, the platoons in the one-lane section of the opposite direction – where passing is not allowed – will be getting more numerous and longer. In addition a minimal length of two-lane sections based on traffic safety criteria (e.g. number of conflicts at the end of the passing lane) should be defined.

At the beginning national and international literature was analyzed. Then 15 two-lane sections were selected for empirical studies. The relevant characteristics of traffic flow, passing process, platooning and dissolving of platoons were described as well as the developed investigation method and the statistical procedures used for evaluating the observations. The results were edited statistically and – if possible – compared with results from literature. The investigation includes an analysis of the speed on 2+1-routes, the passing process (especially the beginning and the end), the platooning and the dissolving of vehicle platoons. Based on these results different approaches for determining the necessary length of a two-lane section were proved.

In the end a correlation between traffic volume and share of incomplete dissolving processes has been used to define the necessary length of a two-lane section. A maximum length – depending on traffic volume and share of heavy goods vehicles – is also suggested. This restriction shall prevent that the length of a two-lane section and with it the length of the one-lane section of the opposite direction will increase excessively. Otherwise negative effects on platooning must be expected. Finally a minimum length according to traffic safety is recommended for two-lane sections. This recommendation is based on the relation between the share of vehicles changing from the passing to the right lane on the last 200 m of a two-lane section related to the total number of all passing processes and the number of conflicts while changing from the passing to the right lane on the last 200 m of these sections. The overall result of this investigation is a simplified method for determining the optimal length of two-lane sections.

In connection with the proceedings of BRANNOLTE, BASELAU and DONG (2004) respectively BASELAU (2006) traffic engineers can use both these tools: One for planning new 2+1-routes, the other for validating the traffic quality on 2+1-routes (new and old ones).

Beside the new method for determining the optimal length of two-lane sections the investigation also provided new details for the design of the cross section and the type of junction for 2+1-routes. These details are based on data extracted from analyzed literature.

Glossar

2+1-Strecke

Straße mit dem einbahnigen dreistreifigen Regelquerschnitt 15,5 und der Betriebsform b2+1, die mindestens drei Überholabschnitte enthält, wobei nicht alle in einer Fahrtrichtung angeordnet sein dürfen. Die Zuordnung des mittleren Fahrstreifens zu einer der beiden Fahrtrichtungen erfolgt alternierend über die 2+1-Strecke.

Allein Fahrender

Als allein Fahrender gilt ein Kraftfahrzeugführer, wenn er sowohl zu dem Vorrausfahrenden als auch zu dem nachfolgenden Fahrzeug eine bestimmte Mindest-Zeit- bzw. -Weglücke einhält (vgl. auch *Frei Fahrender*).

Durchgangsstrom

Als Durchgangsstrom wird derjenige Verkehrsstrom bezeichnet, der bei Untersuchungsabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, auf dem linken Fahrstreifen, d.h. aus der Vorlaufstrecke, in den Überholabschnitt einfährt.

Einfahrstrom

Der Einfahrstrom ist derjenige Verkehrsstrom, der bei Untersuchungsabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, auf dem von rechts addierten Fahrstreifen in den Überholabschnitt einfährt.

Fahrzeugverfolgung

Im Rahmen der Auswertungen zum Überholverhalten bezeichnet die Fahrzeugverfolgung, die Beobachtung eines Fahrzeugs von der Einfahrt in den zweistreifigen Überholabschnitt bis zu dessen Ende mit Hilfe der Videotechnik.

Frei Fahrender

Als frei Fahrender gilt ein Kraftfahrzeugführer, wenn er zu dem vorrausfahrenden Fahrzeug eine bestimmte Mindest-Zeit- bzw. -Weglücke einhält. Eine mögliche Beeinflussung durch ein oder mehrere nachfolgende Fahrzeuge bleibt dabei unberücksichtigt (vgl. auch *Allein Fahrender*).

Landstraßen

Landstraßen im Sinne der neuen, in der Erarbeitung befindlichen Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL, FGSV, 2007) sind anbaufreie einbahnige Straßen außerhalb bebauter Gebiete sowie kurze anbaufreie zweibahnige Straßenabschnitte im Zuge solcher Straßen.

Nicht erfasste Bereiche

Mit dem Ausdruck „nicht erfasste Bereiche“ werden die Bereiche eines Untersuchungsabschnitts bezeichnet, die nicht mittels der in Reihe geschalteten Videokameras messtechnisch erfasst wurden bzw. bei der anschließenden Auswertung durch ungünstige Umgebungsverhältnisse (z.B. Licht oder Witterung) nicht betrachtet werden konnten (vgl. Ziffer 5.2).

Position

2+1-Strecken sind durch alternierende Überholabschnitte charakterisiert. In jeder Fahrtrichtung wechseln sich einstreifige Vorlaufstrecken und zweistreifige Überholabschnitte ab. Die Position beschreibt die Lage eines Überholabschnitts in der jeweiligen Fahrtrichtung. Der in Fahrtrichtung erste Überholabschnitt einer 2+1-Strecke befindet sich somit an Position 1, der zweite Überholabschnitt an Position 2 usw.. Die nachfolgende Abbildung soll diese Definition veranschaulichen.

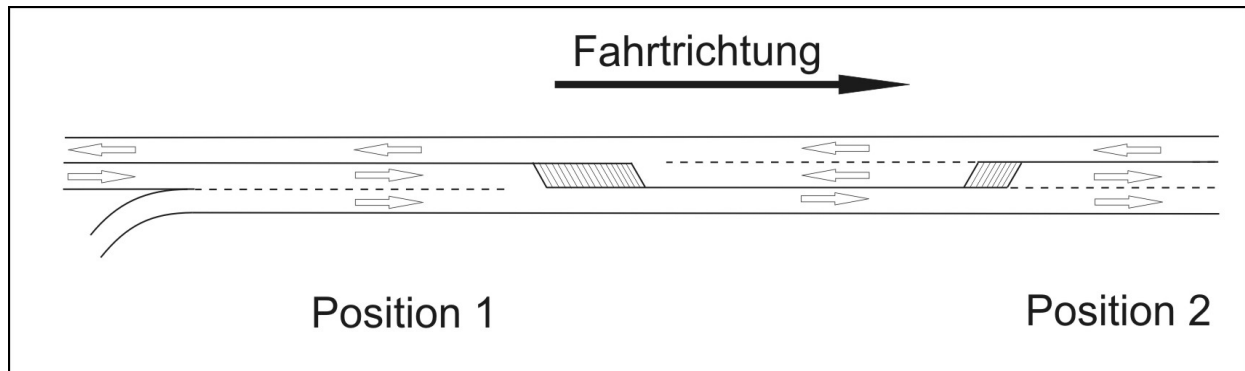


Bild: Positionen von Überholabschnitten (PRIEMER, 2004)

Die Vorlaufstrecke an Pos. 1 bzw. vor einem Überholabschnitt an Pos. 1 befindet sich außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke. Erst die Vorlaufstrecke an Pos. 2, d.h. nach dem Überholabschnitt an Pos. 1, liegt innerhalb der 2+1-Strecke.

Pulkanalyse

Gemeinsame Betrachtung von Pulkbildung sowie Pulkauflösung.

Pulklänge

Die Pulklänge entspricht der Anzahl von Fahrzeugen in einem Pulk. ROOS bezeichnet sie als „Fahrzeuge im Pulk“ (ROOS, 1989).

Teilplanfreier bzw. teilplangleicher Knotenpunkt

Als teilplanfreier Knotenpunkt wird gemäß den neuen, in der Erarbeitung befindlichen Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL, FGSV, 2007) das „halbe Kleeblatt“ bezeichnet. In älteren Arbeiten wird für diese Knotenpunktart noch der Begriff „planfreier“ Knotenpunkt verwendet. Ein teilplangleicher Knotenpunkt bezeichnet einen Knotenpunkt der Grundform IV, der in älteren Arbeiten gemäß den RAS-K-1 (FGSV, 1988) seinerseits noch als teilplanfreier Knotenpunkt geführt wird.

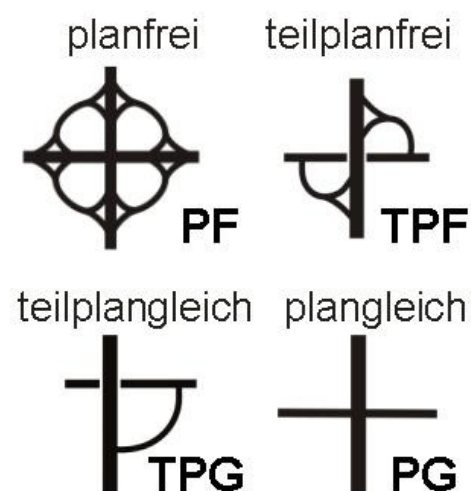


Bild: Ausgewählte Knotenpunktarten gemäß den neuen, in der Erarbeitung befindlichen Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL, FGSV, 2007)

Überholabschnitt

Der Überholabschnitt bezeichnet den Teil einer 2+1-Strecke, indem in der entsprechenden Fahrtrichtung den Kraftfahrzeugführern zwei Fahrstreifen zur Verfügung stehen und sie somit überholen können, ohne den Gegenverkehr beachten zu müssen.

Überholdruck

Beim Begriff „Überholdruck“ gilt es zwischen einem psychologisch begründeten, inneren Bedürfnis auf der einen Seite und dem verkehrstechnisch messbaren Überholdruck auf der anderen Seite zu unterscheiden. Der psychologisch begründete Überholdruck entsteht dabei aufgrund von Frustration und Ärger, wenn eine Person seinen Geschwindigkeits- und den daraus ggf. resultierenden Überholwunsch nicht verwirklichen kann. Der verkehrstechnisch messbare Überholdruck ergibt sich aus der Differenz zwischen den erforderlichen Überholraten, um die Wunschgeschwindigkeiten beibehalten zu können, und den tatsächlichen Überholraten (vgl. dazu vor allem LEUTZBACH und BRANNOLTE, 1989).

Untersuchungsabschnitt

Ein Untersuchungsabschnitt bezeichnet den messtechnisch erfassten Überholabschnitt.

Untersuchungsstrecke

Eine Untersuchungsstrecke bezeichnet eine 2+1-Strecke in ihrer Gesamtlänge. Sie enthält i.d.R. mehrere Untersuchungsabschnitte, aber u.U. auch noch weitere Überholabschnitte, die nicht messtechnisch erfasst wurden.

Vorlaufstrecke

Als Vorlaufstrecke wird der einstreifige Abschnitt vor einem Überholabschnitt bezeichnet. Die Vorlaufstrecke kann dabei innerhalb oder außerhalb der 2+1-Strecke liegen (vgl. *Position*).

Die Länge einer Vorlaufstrecke außerhalb einer 2+1-Strecke kann nur durch eine vereinfachende Festlegung bestimmt werden. Die Länge einer solchen Vorlaufstrecke wird als die Strecke definiert, die zwischen dem Beginn des Überholabschnitts bis zu einem davor gelegenen Knotenpunkt oder Ortseingang zurückreicht. An Knotenpunkten stellen zum einen Lichtsignalanlagen einen erheblichen Eingriff in die Pulkbildung dar. Zum anderen ändern sich hier die Verkehrsstärke und u.U. auch die Verkehrszusammensetzung. Beide Kennwerte beeinflussen u.U. die Pulkbildung.

Die Vorlaufstreckenlänge bei Überholabschnitten, die nicht an Pos. 1 liegen, wird als die Strecke zwischen dem Ende des davor liegenden und dem Beginn des nachfolgenden Überholabschnitts definiert (vgl. Ziffer 3).

Wunschgeschwindigkeit

Mit dem Begriff Wunschgeschwindigkeit wird in Anlehnung an z.B. WIEDEMANN (1974) die (freie) Geschwindigkeit bezeichnet, die ein Fahrer mit seinem Fahrzeug unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen einhält, wenn er nicht von anderen Verkehrsteilnehmern in seiner Geschwindigkeitswahl beeinflusst wird, d.h. unbehindert fahren kann oder bei Behinderung anstrebt zu fahren (vgl. Ziffer 5.4). In einigen Untersuchungen wird auch eine Beeinflussung durch nachfolgende Fahrzeuge bei der Ermittlung der Wunschgeschwindigkeiten berücksichtigt (vgl. auch *Allein* bzw. *Frei Fahren*der).

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangslage und Zielsetzung	1
1.2	Methodisches Vorgehen.....	2
2	Literaturanalyse	3
2.1	Historischer Rückblick	3
2.2	Einsatz und Ausbildung des Regelquerschnitts 15,5 gemäß der deutschen Richtlinien.....	6
2.3	Untersuchungen zum Verkehrsablauf.....	7
2.3.1	Allgemeines	7
2.3.2	Geschwindigkeitsverhalten auf einbahnigen Außerortsstraßen	8
2.3.3	Untersuchungen zum Verkehrsablauf auf 2+1-Strecken	9
2.4	Untersuchungen zur Verkehrssicherheit auf 2+1-Strecken.....	10
2.5	Untersuchungen zum Überholverhalten	15
2.5.1	Allgemeines	15
2.5.2	Überholverhalten und Pulkanalyse auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen.....	17
2.5.3	Überholverhalten und Pulkanalyse auf 2+1-Strecken	20
2.6	Dokumentation von 2+1-Strecken	24
2.7	Fazit	24
3	Auswahl von Untersuchungsabschnitten.....	25
4	Kenngroßen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs, des Überholverhaltens sowie der Pulkanalyse.....	29
4.1	Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung	30
4.2	Geschwindigkeiten	30
4.3	Ein- und Ausschervorgänge	30
4.4	Überholweg und Überholrate.....	31
4.5	Pulkbildung	32
4.5.1	Anzahl Pulks	32
4.5.2	Fahrzeuge in Pulks	32
4.5.3	Pulkanteil	32
4.5.4	Pulklänge	33
4.6	Pulkauflösung.....	33
4.7	Pulkführer.....	33

5	Durchführung der empirischen Untersuchungen	34
5.1	Einsatz von Videotechnik	34
5.2	Stationierung und „nicht erfasste Bereiche“	35
5.3	Aufnahmezeiträume	36
5.4	Geschwindigkeitsmessungen	36
6	Auswertungsmethodik	38
6.1	Allgemeines.....	38
6.2	Auswertungsraster	39
6.3	Wahl eines Bezugsintervalls.....	39
6.4	Auswertezeiträume.....	40
6.5	Verkehrsstärke und -zusammensetzung	40
6.6	Lokale Geschwindigkeiten.....	41
6.6.1	Allgemeines	41
6.6.2	Deskriptive Statistik zur Darstellung der beobachteten Geschwindigkeitsverteilungen	41
6.6.3	Aus Stichproben ermittelte statistische Kenngrößen.....	42
6.6.4	Statistische Tests.....	44
6.6.5	Theil'scher Ungleichheitskoeffizient U	46
6.7	Ein- und Ausschervorgänge	48
6.8	Pulkbildung	50
6.8.1	Anzahl Pulks	50
6.8.2	Fahrzeuge in Pulks	50
6.8.3	Pulkanteil	51
6.8.4	Pulklänge	51
6.9	Pulkauflösung.....	52
6.9.1	Aufgelöste Pulks	52
6.9.2	Deskriptive Statistik zur Darstellung der beobachteten Überholwege bis zur Pulkauflösung	54
6.9.3	Nicht aufgelöste Pulks	54
6.10	Pulkführer.....	54
6.11	Analyse der empirischen Untersuchungen	55
7	Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung	55
8	Lokale Geschwindigkeiten	56
8.1	Geschwindigkeitsverteilung und statistische Kenngrößen	56
8.2	Test auf Normalverteilung (χ^2 -Test).....	59
8.2.1	Vorlaufstrecken.....	60

8.2.2	Überholfahrstreifen	61
8.3	Test auf gleiche Grundgesamtheit (KS-Test)	62
8.4	Geschwindigkeitsverhalten auf den Vorlaufstrecken außerhalb einer 2+1-Strecke	63
8.5	Geschwindigkeitsverhalten auf den Vorlaufstrecken innerhalb einer 2+1-Strecke	65
8.6	Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten auf den Überholfahrstreifen	66
8.6.1	Überholabschnitte an Pos. 1	69
8.6.2	Überholabschnitte nicht an Pos. 1	72
8.7	Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und Exzessivgeschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen	74
8.7.1	Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	75
8.7.2	Vorkommenshäufigkeit von Exzessivgeschwindigkeiten	75
8.8	Zusammenfassung der Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens auf 2+1-Strecken	76
9	Überholverhalten	77
9.1	Verteilung der Ein- und Ausschervorgänge über die gesamte Länge	77
9.2	Überholvorgänge	79
9.3	Ein- und Ausschervorgänge am Beginn und am Ende	81
9.3.1	Sperrflächenüberfahrten am Beginn	81
9.3.2	Ein- und Ausschervorgänge am Beginn	82
9.3.3	Ein- und Ausschervorgänge am Ende	83
9.3.4	Sperrflächenüberfahrten am Ende	85
9.4	Verkehrssituationsanalyse	87
9.5	Zusammenfassung der Analysen zum Überholverhalten	90
10	Pulkbildung	92
10.1	Allgemeines	92
10.2	Einflüsse auf die Pulkbildung	94
10.3	Pulkbildung auf Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken	95
10.3.1	Allgemeines	95
10.3.2	Anzahl Pulks	96
10.3.3	Fahrzeuge in Pulks	97
10.3.4	Pulkanteil	98
10.3.5	Pulklänge	100
10.4	Pulkbildung auf Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken	102
10.4.1	Allgemeines	102
10.4.2	Anzahl Pulks	102
10.4.3	Fahrzeuge in Pulks	104

IV

10.4.4 Pulkanteil	105
10.4.5 Pulklänge	109
10.5 Zusammenfassung der Analysen zur Pulkbildung	116
11 Pulkführer	117
11.1 Beginn der Pulkauflösung bei Untersuchungsabschnitten mit Fahrstreifenaddition	118
11.2 Beginn der Pulkauflösung bei Untersuchungsabschnitten mit unkritischem Wechsel	119
12 Pulkauflösung	119
12.1 Aufgelöste Pulks	119
12.2 Nicht aufgelöste Pulks	127
12.3 Zusammenfassung der Analysen zur Pulkauflösung	129
13 Bestimmung der optimalen Länge von Überholabschnitten.....	130
14 Empfehlungen	131
14.1 Allgemeines.....	131
14.2 Ermittlung der optimalen Länge eines Überholabschnitts	131
14.3 Querschnittsgestaltung.....	134
14.4 Knotenpunkte	134
Literaturverzeichnis	136
Abbildungsverzeichnis	142
Tabellenverzeichnis	145
Anhang	

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

In den achtziger Jahren zeigten Sicherheitsanalysen sehr deutlich die im Vergleich zu zweibahnigen Außerortsstraßen wesentlich geringere Verkehrssicherheit auf einbahnigen Straßen außerhalb geschlossener Ortslagen. Auf einbahnigen zweistreifigen Landstraßen kam und kommt es auch heute noch häufig zu folgenschweren Kollisionen mit dem Gegenverkehr im Zuge von Überholvorgängen. Dies zeigt auch ein Blick in die amtliche Unfallstatistik. Demnach wurden im Jahr 2006 265 Menschen auf Bundesstraßen bei einem „Überholunfall“ (Kombination aus Unfalltyp 6 und Unfallart 4, nach BRANNOLTE ET AL. (1991), vgl. Ziffer 2.4) getötet. Dies entspricht einem Anteil von 21 % an der Gesamtzahl der im Jahr 2006 bei einem Verkehrsunfall auf Bundesstraßen Getöteten. Damit liegt der „Überholunfall“ an zweiter Stelle und nur um 5 % unter dem traurigen Spitzenreiter, dem Fahrnfall (Typ 1) mit einem Abkommen von der Fahrbahn (Art 8 und 9).

Die Ursache für einen „Überholunfall“ liegt oft darin, dass die zur Verfügung stehende Weglücke und/oder die Geschwindigkeit der entgegenkommenden Fahrzeuge von den Verkehrsteilnehmern falsch eingeschätzt werden. Darüber hinaus werden aber auch häufig aufgrund aufgestauter Aggressionen bewusst riskante Überholmanöver durchgeführt. Die wichtigste psychologische Voraussetzung zur Entstehung von Aggressionen sind Frustration und Ärger. Sie entstehen, wenn die für eine Person wichtigen Ziele nicht erreicht oder deren Erreichen blockiert werden. Zeitdruck und unterschiedliche Fahrmotive sind nur zwei von einer Vielzahl von Faktoren für das Entstehen aggressiver Verhaltensweisen. Die Aggressionen und somit die Risikobereitschaft steigen dabei umso mehr, je größer der Überholdruck auf einer Strecke wird. Mit Überholdruck wird der Umstand beschrieben, dass es mangels ausreichender Möglichkeiten zum Überholen im Gegenverkehr, sei es durch fehlende Überholsichtweite oder zu starken Gegenverkehr, häufig zur Pulkbildung kommt. Schnellere Fahrzeuge fahren auf langsamere Fahrzeuge auf und werden demnach in ihrem Ziel blockiert, mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren zu können, d.h. die gewünschten Überholungen entsprechen bei weitem nicht den tatsächlichen (= verkehrstechnischer Überholdruck, vgl. LEUTZBACH und BRANNOLTE, 1989). Mit zunehmender Zeitspanne, in der die Kraftfahrzeugführer in ihrer Wunschgeschwindigkeit eingeschränkt sind, wächst somit der Wunsch, das vorausfahrende Fahrzeug zu überholen (= psychologischer Überholdruck). Das Ergebnis sind zahlreiche Überholmanöver unterhalb der erforderlichen Zeitlücke im Gegenverkehr, die nicht gerade selten zu einem Unfall mit i.d.R. schwerem Personenschaden führen.

Um dem Problem der Gegenverkehrsunfälle nicht durch den Bau von kostenintensiven zweibahnigen Straßen entgegentreten zu müssen, wurde in den 80ern in Deutschland verstärkt über die Anwendung von „Zwischenquerschnitten“ nachgedacht. Eine Zusammenfassung dieser Überlegungen findet sich in einem Projektbericht der von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) beauftragten Projektgruppe „Zwischenquerschnitte“ aus dem Jahre 1992 (BRANNOLTE ET AL., 1992). Das Ergebnis war schließlich die Entwicklung des einbahnigen dreistreifigen Regelquerschnitts (RQ) 15,5. Bei dieser Querschnittsform wird der mittlere Fahrstreifen alternierend einer der beiden Fahrtrichtungen zugewiesen (Betriebsform b2+1). Durch die alternierende Zuordnung erhält der Verkehrsstrom der einen Fahrtrichtung die Möglichkeit zum Überholen, ohne dabei den Gegenverkehr beachten zu müssen. 2+1-Strecken können somit eine wirksame

Maßnahme zur Vermeidung der i.d.R. folgeschweren Überholunfälle darstellen. Mit der beschriebenen Betriebsform b2+1 wurde der RQ 15,5 in die RAS-Q 96 (FGSV, 1982) als Regelquerschnitt aufgenommen. Seitdem findet dieser Zwischenquerschnitt Eingang in die deutsche Entwurfspraxis.

Neben den Vorteilen im Hinblick auf die Verkehrssicherheit bieten 2+1-Strecken auch Vorteile im Hinblick auf die erzielbaren Reisegeschwindigkeiten (vgl. z.B. BRANNOLTE ET. AL., 1992). In den zweistreifigen Abschnitten kommt es durch die Entflechtung des langsamen vom schnelleren Verkehr zu einer Erhöhung der mittleren Reisegeschwindigkeit. Das Optimum im Hinblick auf den Reisezeitgewinn wird dann erreicht, wenn alle sich vor der Einfahrt in den Überholabschnitt in einem Pulk befindlichen Fahrzeuge ihren Pulkführer überholen können. Der Frage nach der erforderlichen Länge der jeweiligen Überholabschnitte für eine solche vollständige Pulkauflösung kommt somit auch hinsichtlich des Verkehrsablaufs eine entscheidende Rolle bei der Ausbildung von 2+1-Strecken zu. Bei der Dimensionierung der Überholabschnitte darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass es in der Gegenrichtung durch die Anordnung des notwendigen Überholverbots im einstreifigen Abschnitt zur Pulkbildung kommt.

In den vergangenen Jahren wurden mehrere Forschungsarbeiten durchgeführt, die sich mit der Verkehrssicherheit und der Untersuchung des Verkehrsablaufs auf 2+1-Strecken beschäftigten. Umfassende Erkenntnisse über das Überholverhalten und die Pulkauflösung in Abhängigkeit von entwurfstechnischen und verkehrlichen Randbedingungen lagen bisher nicht bzw. nur auf Basis modelltechnischer Überlegungen vor.

Das vorrangige Ziel der vorliegenden Dissertation besteht daher in der Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der optimalen Abschnittslänge von Überholabschnitten von 2+1-Strecken auf der Basis von empirischen Untersuchungen. Die besondere Problematik liegt dabei in der Lösung eines Zielkonflikts: Zum einem soll ein Überholabschnitt so bemessen sein, dass möglichst alle in den zweistreifigen Abschnitt einfahrenden Pulks an dessen Ende aufgelöst sind. Zum anderen darf der Überholabschnitt jedoch auch nicht zu lang sein, da sich dies unmittelbar auf die Länge des einstreifigen Abschnitts der Gegenrichtung und somit auf die Pulkbildung auswirkt. Neben der Dimensionierung des Überholabschnitts auf Basis der Pulkauflösung werden auch Aspekte der Verkehrssicherheit in die Untersuchung einbezogen.

Die Basis für diese Dissertation bildet das von FRIEDRICH, IRZIK und DAMMANN bearbeitete Forschungsprojekt „Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken“ im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) aus dem Jahre 2003. Die im Rahmen des Forschungsprojekts erhobenen empirischen Daten wurden in der vorliegenden Dissertation zum großen Teil weitergehenden (statistischen) Analysen unterzogen als dies im Rahmen des zeitlich begrenzten und budgetierten Forschungsprojekts möglich war. Darüber hinaus wurde mit Hilfe von studentischen Arbeiten (KIRSCH und WOLF, 2005 sowie LIESKE und WENKER, 2005) das im Rahmen des Forschungsprojekts aufgenommene Videomaterial unter weiterführenden Gesichtspunkten ausgewertet. Die somit neu geschaffenen Daten wurden ebenfalls in die Analysen dieser Dissertation eingebunden.

1.2 Methodisches Vorgehen

In einem ersten Arbeitsschritt wird zunächst der aktuelle Wissensstand im Hinblick auf die zu bearbeitende Thematik zusammenfassend dargestellt. Nachdem die Auswahl der Untersuchungsabschnitte beschrieben wurde, werden die relevanten Kenngrößen des Verkehrsablaufs, des Überholverhaltens sowie der Pulkbildung und -auflösung vorgestellt. Im Anschluss an die

Beschreibung der entwickelten und angewendeten Untersuchungsmethodik für die Durchführung der empirischen Untersuchungen wird das Vorgehen und die dabei verwendeten Verfahren bei der Analyse der empirisch gewonnen Daten aufgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden i.d.R. statistisch aufbereitet dargestellt, und ggf. mit Ergebnissen zurückliegender Untersuchungen abgeglichen. Neben einer Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens, des Überholverhaltens (hierbei insbesondere des Ein- und Ausscherverhaltens) sowie der Pulkbildung im Vorfeld sowie im Zuge von 2+1-Strecken werden auch verschiedene Ansätze zur Bestimmung einer zur Pulkauflösung erforderlichen Länge von Überholabschnitten auf 2+1-Strecken betrachtet.

Abschließend werden auf der Basis zurückliegender Arbeiten sowie anhand der neu gewonnenen Erkenntnisse Empfehlungen zur Gestaltung und zum Betrieb von 2+1-Strecken gegeben. Insbesondere beziehen sich diese Empfehlungen auf die Bestimmung der im Bezug auf die Pulkauflösung und Pulkbildung optimalen Länge von Überholabschnitten auf 2+1-Strecken sowie auf eine aus Gründen der Verkehrssicherheit erforderliche minimale Länge.

2 Literaturanalyse

2.1 Historischer Rückblick

Anfang der achtziger Jahre wurden in Deutschland die Anstrengungen intensiviert, sich dem Thema „Zwischenquerschnitte“ zu widmen. Zuvor waren dreistreifige Außerortsstraßen in Deutschland wegen erheblicher Sicherheitsbedenken nur sehr selten gebaut worden (ROOS, 1989). Jedoch stellte vor allem der Sicherheitsvergleich zwischen zwei- und einbahnigen Außerortsstraßen im Hinblick auf die im Allgemeinen folgenschweren Überholunfälle ein entscheidendes Kriterium dar, sich mit dem Thema „Zwischenquerschnitte“ zu befassen (vgl. Ziffer 1.1).

Neben den Aspekten der Verkehrssicherheit setzte jedoch in Deutschland auch eine Veränderung der Wertvorstellung im außerörtlichen Straßenbau ein. Im Zuge der immer stärker werdenden Berücksichtigung von Umweltbelangen sowie aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen wurden teilweise bereits geplante Autobahnen angezweifelt und mit Überlegungen begonnen, wie das Verkehrsaufkommen mit weniger Flächenverbrauch und geringeren Kosten bewältigt werden kann. Es wurde deshalb nach geeigneten Zwischenlösungen gesucht, die Lücke zwischen zweistreifigen und zweibahnigen mehrstreifigen Außerortsstraßen zu schließen (BRANNOLTE ET. AL., 1992).

Trotz der vorliegenden Erfahrungen aus dem Ausland wurde in Deutschland zu Beginn der achtziger Jahre teilweise kontrovers diskutiert, wie man eine dreistreifige Straße am günstigsten betreibt. In den Jahren 1983/84 ergab sich erstmalig die Gelegenheit im Rahmen eines deutschen Modellversuchs auf der B 33 (Baden-Württemberg) eine einbahnig dreistreifig markierte Landstraße mit wechselseitig angeordneten Überholfahrstreifen hinsichtlich der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufs zu untersuchen (MEEWES und MAIER, 1984). Als wesentliche Ergebnisse konnten erarbeitet werden:

- Die Reisegeschwindigkeiten sind NACHER (=b2+1) werktags trotz des vergleichsweise hohen Schwerverkehrs-(SV-) Anteils gegenüber dem VORHER zweistreifigen Betrieb nicht abgesunken.
- Nach einer Fahrbahndeckenerneuerung und der Ummarkierung der VORHER 11,50 m breiten zweistreifigen (befestigten) Fahrbahn hin zu einer 2+1-Strecke hat es keine schweren

Unfälle mit Gegenverkehr mehr gegeben. Im VORHER-Zeitraum kam es hingegen regelmäßig zu folgeschweren Unfällen durch Konflikte mit dem Gegenverkehr.

- Durch die Verbesserung der Verkehrssicherheit übersteigt der volkswirtschaftliche Nutzen die Kosten für die Ummarkierung und Beschilderung um das Zehnfache (bezogen auf eine Nutzungsdauer von 10 Jahren).
- Die geänderte Verkehrsführung fand bei den befragten Kraftfahrzeugführern eine breite Zustimmung.
- Die Länge der zweistreifigen Überholabschnitte ist auf 1.000 bis 1.400 m zu begrenzen.

Im Jahr 1984 wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) die Aufgabe übernommen, durch eine Projektgruppe Fragen bezüglich der Kapazität und der Verkehrssicherheit von Zwischenquerschnitten zu klären. Diese Fragen beschäftigen zwar bis heute die Forschung, jedoch fasste die Projektgruppe die von ihr erarbeiteten Erkenntnisse in einem Projektbericht 1992 zusammen (BRANNOLTE ET. AL., 1992). Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden kurz aufgeführt.

- Die Qualität des Verkehrsablaufs kann durch Zwischenquerschnitte erheblich verbessert werden. Dies drückt sich vor allem durch höhere Reisegeschwindigkeiten aus.
- Oftmals muss eine Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit registriert werden.
- Die Kapazität von zweistreifigen Außerortsstraßen kann durch Zwischenquerschnitte kaum, sondern lediglich durch vierstreifige Querschnitte gesteigert werden.
- Im Gegensatz zu den Querschnitten b2s und b2ü (vgl. Bild 2.1 und Bild 2.2) werden Überholvorgänge auf b2+1-Strecken räumlich getrennt abgewickelt. Dies führt zu einer verbesserten Verkehrssicherheit und wird von den Verkehrsteilnehmern als positiv beurteilt.
- b2+1-Strecken sollten lediglich als Kraftfahrstraße (Zeichen 331 StVO) betrieben werden. Andernfalls sollte der b2s-Querschnitt zum Einsatz kommen.
- Simulationsrechnungen zeigten durch vergleichsweise höhere Reisegeschwindigkeiten und eine geringere Pulkbildung, dass die Auswirkungen auf den Verkehrsablauf am günstigsten bei Anordnung von 2-streifigen Abschnitten mit Längen zwischen 1.000 und 1.400 m und zwei bzw. vier Abschnitten waren.

Die positiven Erkenntnisse der Projektgruppe führten schließlich dazu, dass der RQ 15,5 seit 1996 in den deutschen Entwurfsrichtlinien (RAS-Q 96, FGSV, 1982) enthalten ist.

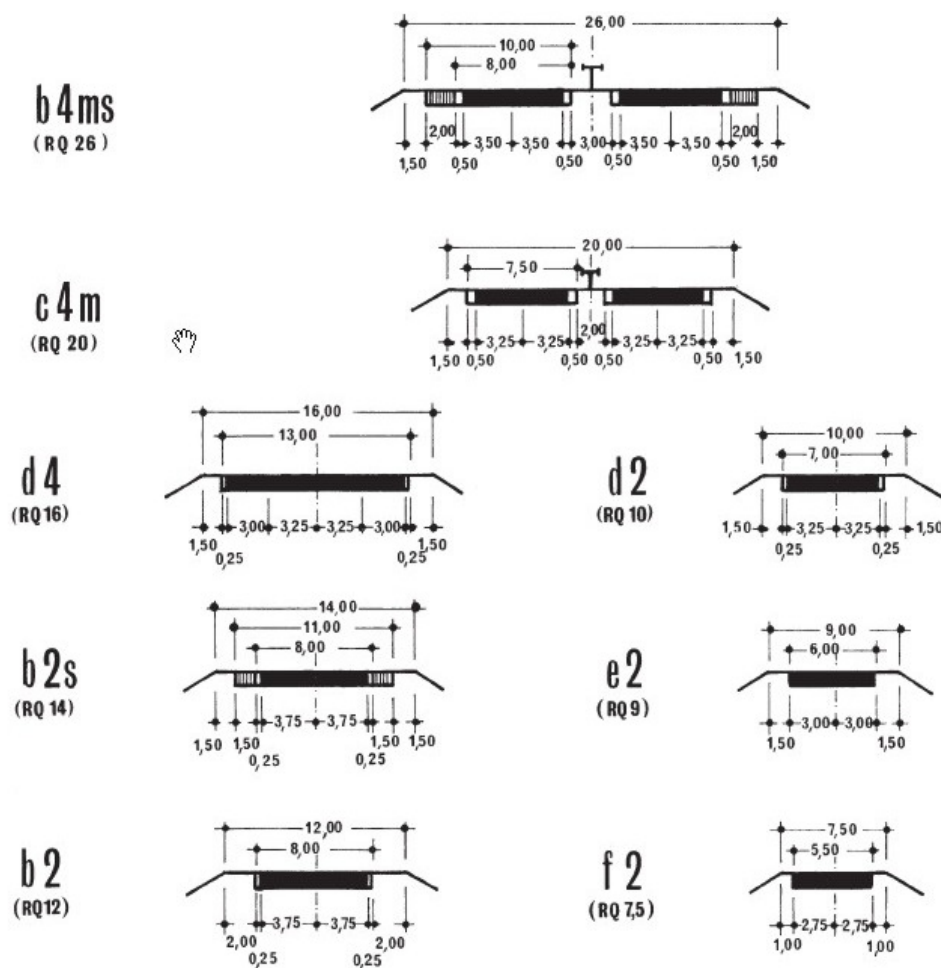


Bild 2.1: Regelquerschnitte gemäß den RAS-Q 82 (FGSV, 1982)

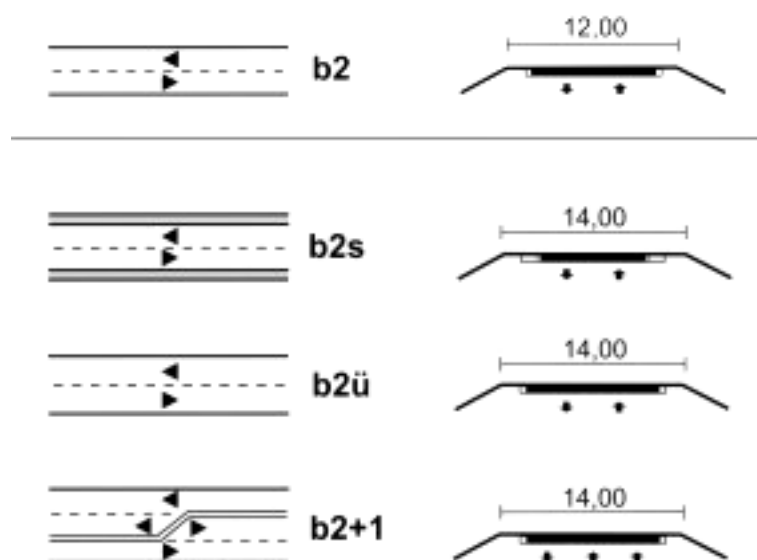


Bild 2.2: Von der Projektgruppe „Zwischenquerschnitte“ betrachtete Querschnitte (BRANNOLTE ET. AL., 1992)

2.2 Einsatz und Ausbildung des Regelquerschnitts 15,5 gemäß der deutschen Richtlinien

Seit 1996 ist der RQ 15,5 in den deutschen Entwurfsrichtlinien (RAS-Q 96, FGSV, 1982) enthalten (vgl. Ziffer 2.1). Die Fahrstreifenbreiten betragen in der einstreifigen Fahrtrichtung in der Regel 3,75 m, in der zweistreifigen Fahrtrichtung 3,25 m bzw. 3,50 m. Im Bild 2.3 ist der RQ 15,5 grafisch dargestellt.

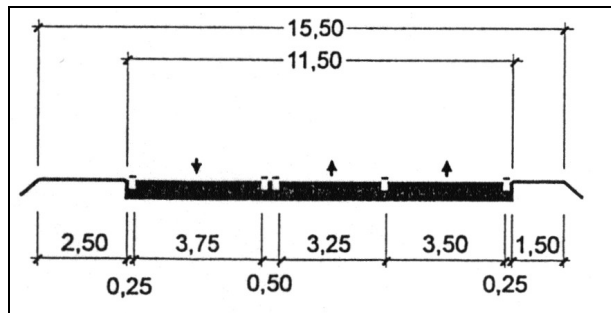


Bild 2.3: Regelquerschnitt 15,5 nach den RAS-Q 96 (FGSV, 1982)

Gemäß den RAS-Q 96 ist dieser Querschnitt für durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken (DTV) zwischen 5.000 und 22.500 Kfz/24h geeignet.

Weiterhin wird in den RAS-Q 96 gemäß dem Bericht der Projektgruppe „Zwischenquerschnitte“ empfohlen, den RQ 15,5 (bzw. 2+1 Strecken) ausschließlich als Kraftfahrstraße (Zeichen 331 StVO) zu betreiben (BRANNOLTE ET. AL., 1992). Nur in Ausnahmefällen sollen einzelne Abschnitte für den allgemeinen Verkehr freigegeben werden. Hintergrund dieser Forderung sind Aspekte des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit (vgl. Ziffer 2.1).

In den RAS-Q 96 wird dem RQ 15,5 in Bezug auf die Verkehrssicherheit ein deutlicher Vorteil gegenüber den herkömmlichen zweistreifigen Landstraßenquerschnitten bescheinigt. Für einen sicheren Verkehrsablauf sind die Gestaltung, die Markierung und die Beschilderung der Wechselbereiche besonders wichtig. Die Verengung von zwei auf einen Fahrstreifen am Ende des Überholabschnitts wird als kritischer und die Aufweitung von einem auf zwei Fahrstreifen am Beginn als unkritischer Wechsel bezeichnet (vgl. Bild 2.4).

Die kritischen Wechsel sollen gemäß den RAS-Q 96 in der Regel 180 m, mindestens jedoch 120 m, lang sein. Die unkritischen Wechsel sollen eine Länge von mindestens 30 m aufweisen. Außerdem sollen die Wechselstellen in Abschnitten mit stetiger Linienführung liegen. Im Bereich von Kuppen, Brücken oder engen Kurven sind sie zu vermeiden. **Die Länge eines Überholabschnitts soll mindestens 800 m und höchstens 2.000 m betragen.** Die Einhaltung dieser Maße soll gewährleisten, dass einerseits die in den einstreifigen Abschnitten gebildeten Fahrzeugpuls wieder aufgelöst werden können. Andererseits wird einer zu starken Pulkbildung auf dem einstreifigen Abschnitt in der Gegenrichtung entgegengewirkt. Abgeleitet aus den Ergebnissen der Projektgruppe „Zwischenquerschnitte“ gibt die RAS-Q 96 als Empfehlung im Hinblick auf eine **optimale Länge** an, dass diese **bei einem Lkw-Anteil bis zu 15 % 1.000 m bis 1.400 m beträgt. Ist der Lkw-Anteil jedoch größer, sollen kürzere Abschnitte gewählt werden** (BRANNOLTE ET. AL., 1992). Es wird jedoch auch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es für die Bestimmung der optimalen Abschnittslängen wichtige Einflussfaktoren gibt, die sich aus der Örtlichkeit ergeben.

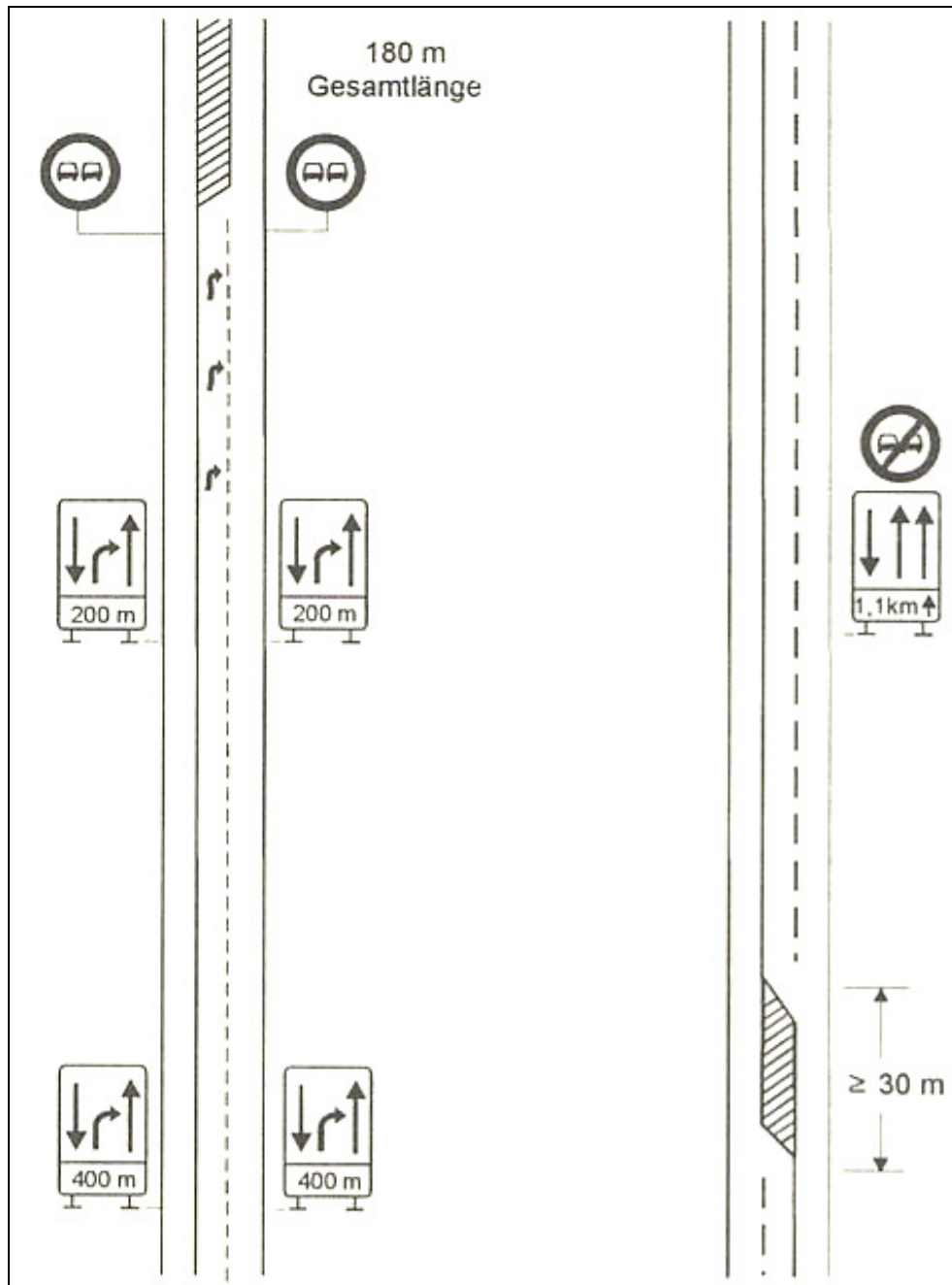


Bild 2.4: Markierung und Beschilderung von Straßen mit dem RQ 15,5 und der Betriebsform 2+1 (links kritischer Wechsel, rechts unkritischer Wechsel) gemäß den RAS-Q 96 (FGSV, 1982)

2.3 Untersuchungen zum Verkehrsablauf

2.3.1 Allgemeines

Es wurden solche Arbeiten analysiert, die hinsichtlich der im Rahmen dieser Untersuchung zu bearbeitenden Fragestellungen als relevant angesehen werden. Der Schwerpunkt lag dabei auf Untersuchungen, die sich mit der Erfassung und Analyse von Geschwindigkeiten im Allgemeinen sowie auf 2+1-Strecken im Besonderen befassen. Darüber hinaus werden auch vorliegende Untersuchungen zur Qualität des Verkehrsablaufs auf 2+1-Strecken aufgeführt.

Zunächst gilt es festzuhalten, dass die relevante Geschwindigkeit, um das Geschwindigkeitsniveau eines Streckenabschnitts zu beschreiben, die Geschwindigkeit der frei bzw. unbehindert

fahrenden Fahrzeugführer ist (vgl. u.a. BUCK, 1992, EBERSBACH, 2006, JÄHRIG, 2006). I.d.R. wird dabei die Geschwindigkeit V_{85} , d.h. die Geschwindigkeit, die von 85 % der unbehindert fahrenden Fahrzeugführer nicht überschritten wird, als charakteristische Größe verwendet.

2.3.2 Geschwindigkeitsverhalten auf einbahnigen Außerortsstraßen

In der Vergangenheit gab es eine Vielzahl von Untersuchungen, die sich mit den Einflüssen auf das Geschwindigkeitsverhalten auf zweistreifigen Außerortsstraßen befasst haben. Da es sich bei den **Vorlaufstrecken an Pos. 1**, d.h. bei den Vorlaufstrecken, die sich außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke befinden, um zweistreifige Straßen handelt, soll im Rahmen der Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens (vgl. Ziffer 8.4) überprüft werden, ob die aus der Literatur vorliegenden Erkenntnisse auf die im Rahmen dieser Untersuchung (wenigen) betrachteten zweistreifigen Strecken übertragen werden können.

In einem ersten Arbeitsschritt werden zunächst die in der Literatur als relevant auf das Geschwindigkeitsverhalten auf Landstraßen identifizierten Einflussfaktoren näher beleuchtet. Übereinstimmend findet man in der Literatur, dass die Geschwindigkeitswahl aus einer Vielzahl von individuellen und fahrzeugtechnischen Eigenschaften, durch die Gestaltung, Ausbildung und Beschaffenheit des Straßenraums sowie durch weitere äußere Randbedingungen, wie z.B. die Witterung, beeinflusst wird. Dieses komplexe System wird am besten durch den vielfach in der Literatur angeführten Regelkreis Fahrer – Fahrzeug – Straße (vgl. z.B. DURTH, 1974) beschrieben.

Dennoch haben sich bei einer Vielzahl von Untersuchungen „immer wieder folgende Größen als maßgebend“ für das Geschwindigkeitsverhalten herausgestellt (vgl. z.B. BAKABA, 2005, BUCK, 1992, SCHMIDT, 1996):

- Längsneigung
- Kurvigkeit bzw. Linienführung und
- Fahrbahnbreite

Aktuelle Hinweise zu diesen Faktoren liefert beispielsweise die Arbeit von BAKABA aus dem Jahre 2005, der Referenzgeschwindigkeiten für Streckentypen ermittelt hat. Die Typisierung der Strecken wurde dabei von BAKABA anhand der Kurvigkeit [gon/km] (Lageplan), der Welligkeit [gon/km] (Höhenplan) und der Fahrbahnbreite [m] (Querschnitt) durchgeführt.

Eine weitere aktuelle Arbeit stammt von EBERSBACH aus dem Jahre 2006. Im Rahmen seiner Dissertation entwickelte EBERSBACH (2006) u.a. Geschwindigkeitsprognosemodelle in Abhängigkeit unterschiedlicher Fahrstilwünsche zur Umsetzung in einem Fahrerassistenzsystem. Somit bestand die Zielsetzung von EBERSBACH (2006) weniger in der Prognose der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten, sondern vielmehr in der Vorgabe einer „empfohlenen“ oder „angemessenen“ Geschwindigkeit durch das Fahrerassistenzsystem.

Beiden Untersuchungen ist gemein, dass sie als frei fahrenden Fahrzeugführer, d.h. nur noch durch die entwurfstechnischen, betrieblichen und gestalterischen Merkmale einer Straße beeinflussten Fahrer als diejenigen betrachten, der eine Nettozeitlücke zum vorausfahrenden $t \geq 7$ s sowie nachfolgenden Fahrzeug $t \geq 4$ s einhält.

BRANNOLTE, BASELAU und DONG weisen jedoch in ihrer Arbeit aus dem Jahre 2004, bei der sie die Zusammenhänge zwischen der Verkehrsstärke und dem Verkehrsablauf auf 2+1-Strecken bei unterschiedlichen entwurfstechnischen Randbedingungen mit Hilfe von empirischen Untersuchungen sowie der Simulation des Verkehrsablaufs betrachteten, darauf hin, dass sich bei

einer zunehmende Belastung der Anteil der unbeeinflussten Fahrzeuge verringert, wodurch Aussagen über die zugrunde liegenden Wunschgeschwindigkeiten immer problematischer würden.

Weiterhin führen sie mit Hinweis auf die Arbeit von MEEWES aus dem Jahre 1993 die Problematik hinsichtlich des Vergleichs verschiedener lokaler Geschwindigkeitsmessungen an, da die Kraftfahrer ihre (Wunsch-) Geschwindigkeit den sich ständig wechselnden Streckencharakteristiken anpassen würden. Bei der Auswahl des Messquerschnitts sei daher stets auf die Auswahl eines für die gesamte Strecke repräsentativen Querschnitts zu achten.

2.3.3 Untersuchungen zum Verkehrsablauf auf 2+1-Strecken

In den letzten Jahren beschäftigten sich mehrere Untersuchungen mit der Erarbeitung neuer Erkenntnisse zum Verkehrsablauf auf 2+1-Strecken. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde eine Vielzahl von empirischen Untersuchungen durchgeführt, um Erkenntnisse bezüglich der Kapazität und des Geschwindigkeitsverhaltens zu ermitteln (vgl. z.B. BASELAU, 2006, BRANNOLTE, BASELAU und DONG, 2004, FROST, KELLER und KIRCHHOFF, 1992, MEEWES und MAIER, 1984, SCHAECHTERLE und LINDNER, 1987). Die Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Kapazität von 2+1-Strecken gleich der von durchgängig zweistreifigen Landstraßenquerschnitten (RQ 10,5, RQ 9,5) ist. Eine Erhöhung der Kapazität durch den Einsatz des RQ 15,5 konnte bisher nicht beobachtet werden.

2+1-Strecken bieten jedoch die Möglichkeit, die Qualität des Verkehrsablaufs in der Form zu verbessern, dass sich Pulks auflösen bzw. das Überholen von langsamen Fahrzeugen erleichtert wird. Als maßgebende Einflussfaktoren auf die Qualität des Verkehrsablaufs wurden in den vergangenen Untersuchungen im Wesentlichen die Länge der einstreifigen Abschnitte, die Gesamtlänge der 2+1-Strecke sowie die Verkehrsstärken genannt.

Die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen von BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) ergaben, dass auf 2+1-Strecken im Vergleich zu herkömmlichen Landstraßen ein zum Teil deutlich höheres Geschwindigkeitsniveau bei vergleichbaren Verkehrsstärken vorliegt. Auch in einer im Jahre 1991 veröffentlichten Untersuchung von HIERSCHE und BICKELHAUPT wurde eine sehr hohe Überschreitungshäufigkeit der zulässigen Geschwindigkeit, insbesondere auf dem Überholfahrstreifen beobachtet. KÖLLE musste in seiner Untersuchung zu den „Sicherheitseigenschaften außerörtlicher Knotenpunkte“ 1999 feststellen, dass im Vergleich zu anderen Querschnitten auf 2+1-Strecken die deutlich höchsten Exzessivgeschwindigkeiten (> 130 km/h) auftreten.

BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) stellten darüber hinaus fest, dass die Überholraten auf 2+1-Strecken in Abhängigkeit von den entwurfs- und verkehrstechnischen Randbedingungen wesentlich höher sind als auf zweistreifigen Landstraßen. Ausgehend von den Ergebnissen der empirischen Untersuchungen sowie unter Berücksichtigung von Simulationsergebnissen leiteten BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) q-v-Diagramme für die ein- und zweistreifigen Abschnitte von 2+1-Strecken her. Unter Verwendung von Korrekturfaktoren werden Einflüsse aus unterschiedlichen Abschnittslängen sowie der Position der Überholabschnitte berücksichtigt. Im Vergleich zu einem herkömmlichen zweistreifigen Landstraßenquerschnitt ergibt sich dabei für den RQ 15,5 bei gleicher Verkehrsbelastung eine höhere Reisegeschwindigkeit bzw. eine geringere Dichte und damit eine bessere Qualität des Verkehrsablaufs. Abschließend wurde von BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) ein Verfahren entwickelt, dass den Nachweis der Qualität des Verkehrsablaufs für den RQ 15,5 ermöglicht.

Im Hinblick auf die in ihrer Untersuchung verwendete Simulation wurden von BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) auch lokale Geschwindigkeiten an den Einfahrquerschnitten der Überholabschnitte sowohl auf dem rechten als auch auf dem linken Fahrstreifen ermittelt. Da jedoch an dieser Stelle die wenigsten Fahrzeuge frei fahrend waren, wurden zusätzlich noch Daten von einer Messstelle verwendet, die innerhalb des zweistreifigen Abschnitts lag. Die genaue Lage dieser Messquerschnitte lässt sich mittlerweile jedoch nicht mehr eindeutig rekonstruieren. Es wurden sowohl die frei fahrenden Pkw als auch SV-Fahrzeuge getrennt erfasst.

Eine Messung der Wunschgeschwindigkeit auf den Vorlaufstrecken war bei der Arbeit von BRANNOLTE, BASELAU und DONG nicht untersuchungsrelevant. Eine Aussage über mögliche Einflüsse auf die Wunschgeschwindigkeiten findet sich somit ebenfalls nicht in der Arbeit von BRANNOLTE, BASELAU und DONG und kann auf Basis der zur Verfügung stehenden Informationen auch nicht abgeleitet werden.

Im Hinblick auf die Fragestellung nach der Freigabe für den allgemeinen Verkehr zeigte die Arbeit von BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004), dass schon wenige langsame Fahrzeuge einen deutlichen negativen Einfluss auf den Verkehrsablauf auf 2+1-Strecken ausüben können (vgl. dazu auch Ziffer 3).

WEBER und LÖHE (2003) führten im Rahmen ihrer Untersuchungen bzgl. der Freigabe von 2+1-Strecken für den allgemeinen Verkehr auf denen von ihnen betrachteten 2+1-Strecken ca. 20 bis 30 Nachfolgefahrten von frei fahrenden Pkw und SV-Fahrzeugen (in Proportion des SV-Anteils auf der jeweiligen Strecke) je Fahrtrichtung durch und stellen ihre Ergebnisse anhand von Geschwindigkeitsprofilen dar. Somit könnte an jeder beliebigen Stelle die V_{85} aus den Geschwindigkeitsprofilen abgelesen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass innerhalb der Überholabschnitte die Wunschgeschwindigkeiten sowohl von Überholenden als auch von Überholten erfasst wurden. Weiterhin wurden auch Querschnittsmessungen vorgenommen. Dabei wurden während mindestens 24 Stunden die Geschwindigkeiten aller Kraftfahrzeuge erfasst.

Ihre Analyse der Geschwindigkeitsprofile zeigte, dass insbesondere die Knotenpunktgrundform sowie die Führung von ein- und abbiegenden Verkehrsströmen einen deutlichen Einfluss auf die Geschwindigkeiten ausüben. Dabei war die geringste Beeinflussung der Geschwindigkeit an teilplanfreien Knotenpunkten mit Fahrstreifenadditionen für die einbiegenden Verkehrsströme festzustellen (vgl. Bild 3.1). An den plangleichen Knotenpunkten im Zuge der von WEBER und LÖHE betrachteten Untersuchungsstrecken war jedoch eine deutliche Geschwindigkeitsreduzierung i.d.R. nur dann festzustellen, wenn die zulässige Geschwindigkeit in diesen Bereichen reduziert war und zu deren Einhaltung ortsfeste Geschwindigkeitsüberwachungsanlagen eingerichtet wurden.

Einen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Anzahl der Fahrstreifen je Fahrtrichtung konnten WEBER und LÖHE nur unter bestimmten Randbedingungen feststellen. Nach ihren Untersuchungen tritt ein Anstieg der Geschwindigkeiten in den zweistreifigen Abschnitten mit zunehmender Abschnittslänge und zunehmendem Schwerverkehrsanteil auf. Eine geringere Geschwindigkeitszunahme in den zweistreifigen Abschnitten wurde bei einer großzügigen Linienführung und weiten Knotenpunktabständen beobachtet.

2.4 Untersuchungen zur Verkehrssicherheit auf 2+1-Strecken

Im Mittelpunkt der vorliegenden Untersuchungen zur Verkehrssicherheit von 2+1-Strecken stand die Ermittlung von Unfallkenngrößen und deren Vergleich mit Unfallkenngrößen anderer Regelquerschnitte von Außerortsstraßen (vgl. u.a. BRANNOLTE ET AL., 1991, BRANNOLTE, BARTH

und SCHWARZMANN, 1993, FROST, KELLER und KIRCHHOFF, 1992, HIERSCHE und BICKELHAUPT, 1991, LINDNER, 1988, MEEWES und MAIER, 1984, PALM und SCHMIDT 1999, WEBER und LÖHE, 2003).

Die Ergebnisse zur Sicherheitsbewertung von 2+1-Strecken lassen sich jedoch insbesondere auf der Basis der Untersuchung von BRANNOLTE ET. AL. (1991) sowie der Untersuchung von PALM und SCHMIDT (1999) wie folgt zusammenfassen:

- Die Unfallrate und die Unfallkostenrate sind bei den Streckenunfällen (Unfalltypen 1 und 4 bis 7) auf 2+1-Strecken geringer als bei einbahnigen zweistreifigen Querschnitten.

Dieses Ergebnis mag mit Blick auf die gewonnen Erkenntnisse über das vergleichsweise hohe Geschwindigkeitsniveau auf 2+1-Strecken (vgl. Ziffer 2.3.3 sowie 8.8) zunächst einmal etwas überraschen. Besteht doch in der Literatur Einigkeit darüber, dass zumindest die Unfallschwere in engem Zusammenhang mit der Geschwindigkeit zu sehen ist. Einige Autoren sehen darüber hinaus sogar einen prinzipiellen Zusammenhang zwischen dem Geschwindigkeitsverhalten und dem Unfallgeschehen. So ist beispielsweise nach KLÖCKNER und KREBS (1977) der Zusammenhang zwischen der Fahrbahnbreite und dem Unfallgeschehen darauf zurückzuführen, dass auf breiteren Fahrbahnen laut ihrer Erfahrung schneller gefahren wird und die Schadensschwere auch eine Funktion der Fahrgeschwindigkeit ist. Dass eine zu hohe Geschwindigkeit als wesentliche Mitbedingung zu vielen Unfällen beiträgt und zumindest für die Unfallschwere mitverantwortlich ist, wird auch von LENZ (1984) noch einmal aufgeführt.

- Bei der Betrachtung der mittleren Unfallschwere aller Unfälle, ausgedrückt durch die in Abhängigkeit vom Querschnitt angepassten Unfallkostensätze WUa für Unfälle mit Personenschaden, fällt das Ergebnis dann auch differenzierter aus. Die mittlere Unfallschwere ist zwar auf 2+1-Strecken ebenfalls deutlich geringer als auf Strecken mit den Querschnitten b2s, b2ü und b2 (vgl. Bild 2.2), jedoch etwas höher als auf dem zusammengefassten Kollektiv der Strecken mit den Querschnitten c2-e2.
- Die vergleichsweise geringen Unfallkostenraten auf 2+1-Strecken resultieren somit daraus, dass dort deutlich weniger Überholunfälle (gekennzeichnet durch die Unfallrate) geschehen. Der Effekt der durch die höheren Geschwindigkeiten verursachten höheren Anteile an Fahr-unfällen sowie der etwas höheren mittleren Unfallschwere wirkt sich dabei nicht maßgeblich auf die Unfallkostenrate aus.¹
- Der interne Vergleich für 2+1-Strecken zeigt, dass die Unfallschwere auf den Überholabschnitten nur bedingt niedriger ist als auf den einstreifigen Abschnitten innerhalb der 2+1-Strecken.

Im Hinblick auf die im Zusammenhang mit 2+1-Strecken besonders interessanten Überholunfälle lassen sich auf der Grundlage der vorliegenden Untersuchungen folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Die Definition eines „Überholunfalls“ unterscheidet sich in den verschiedenen Untersuchungen. Dies gilt es bei einer vergleichenden Bewertung zu beachten. So definieren beispiels-

¹ Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass für die Berechnung der Unfallkosten angepasste Unfallkostensätze in Abhängigkeit von der Verunglücktenstruktur bei den jeweiligen Querschnitten zur Anwendung kamen.

weise BRANNOLTE ET. AL. einen Überholunfall als einen Unfall bei dem der Unfalltyp 6 in der Kombination mit der Unfallart 4 (Unfall im Längsverkehr mit Kollision im Gegenverkehr) vorliegt. Dem entgegen sind bei PALM und SCHMIDT alle Unfälle im Längsverkehr (Typ 6) in Kombination mit den Unfallarten 2, 3, und 4 Überholunfälle.

- PALM und SCHMIDT geben an, dass auf 2+1-Strecken zwar ein gegenüber den b2-Strecken leicht erhöhter Anteil an Überholunfällen (gemäß ihrer Definition) auftritt, jedoch das Risiko bei einem Überholvorgang zu verunfallen auf 2+1-Strecken geringer einzuschätzen ist, da hier deutlich mehr Überholvorgänge bei vergleichbaren Verkehrsstärken als auf den b2-Strecken stattfinden.
- Sie geben weiterhin an, dass bei den Überholunfällen auf 2+1-Strecken der den Unfall verursachende Fehler seltener beim Überholenden liegt.

Fazit

Alle Untersuchungen zeigen, dass 2+1-Strecken im Vergleich zu anderen einbahnigen Außerortsquerschnitten eine höhere Verkehrssicherheit, ausgedrückt durch die Unfallkostenrate, besitzen. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten ist jedoch die mittlere Unfallschwere im Vergleich zu den schmalen zweistreifigen Landstraßen etwas höher.

Im Hinblick auf die Ausbildung der Knotenpunkte im Zuge von 2+1-Strecken lassen sich aus der Literatur weitere Erkenntnisse gewinnen. Wie schon bei den Streckenunfällen (Unfalltypen 1 und 4 bis 7) sind die Unfallrate und die Unfallkostenrate auch bei den Knotenunfällen (Unfalltypen 2 und 3) auf 2+1-Strecken geringer als bei einbahnigen zweistreifigen Querschnitten. Mit dem Hinweis von PALM und SCHMIDT, auf deren Arbeit sich diese Aussage gründet, dass bei 2+1-Strecken eine geringere Anzahl an plangleichen Knotenpunkten als an den zweistreifigen Landstraßenquerschnitten vorliegt, stellt sich somit jedoch noch die Frage, ob teilplanfreie oder teilplangleiche Knotenpunkte an 2+1-Strecken zum Einsatz kommen sollen.

Hinweise auf die Beantwortung dieser Frage können der Arbeit von KÖLLE (1999) entnommen werden. Auf der von KÖLLE betrachteten 2+1-Strecke auf der B 10 bei Landau, liegt ein teilplanfreier und ein teilplangleicher Knotenpunkt vor. Trotz der im Knotenpunktbereich des teilplangleichen Knotenpunkts angeordneten zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h ist die Unfallkostenrate für den baulichen Knotenpunktbereich mehr als doppelt so hoch als die des teilplanfreien Knotenpunkts. Unter Beachtung, dass die Unfallrate in etwa gleich ist, zeigt dieses Ergebnis, dass beim teilplangleichen Knotenpunkt eine deutlich höhere Unfallschwere vorliegt. Diese resultiert daraus, dass trotz des Tempolimits hohe Knotenpunktgeschwindigkeiten beobachtet wurden. So trat die überwiegende Anzahl der Unfälle am teilplangleichen Knotenpunkt denn auch im Knotenpunktbereich der übergeordneten B 10 auf. Beim teilplanfreien Knotenpunkt mussten hier hingegen nur wenige Unfälle registriert werden. Diesen waren dann auch nur Sachschadensunfälle, die durch Fahrstreifenwechsel im Zuge der Fahrstreifenaddition erfolgten. Hauptunfallorte waren hier die plangleichen Einmündungen mit der untergeordneten Straße.

Um auch den Einfluss des Knotenpunkts auf die angrenzende freie Strecke beurteilen zu können, wurden von KÖLLE so genannte „Gesamtsysteme“ gebildet. So bestand beispielsweise ein Gesamtsystem aus dem baulichen Knotenpunktbereich und 500 m der angrenzenden freien Strecke. Hier zeigt der Vergleich zwischen dem Gesamtsystem mit dem teilplangleichen und dem teilplanfreien Knotenpunkt, dass bei Letzterem die Unfallkostenrate sogar nur etwa ein

Fünftel von der für das System mit dem teilplangleichen Knotenpunkt ermittelten Unfallkostenrate beträgt.

In der Untersuchung von KÖLLE lagen noch zwei weitere Knotenpunkte, d.h. ein teilplanfreier Knotenpunkt und eine plangleiche Einmündung, an einer 2+1-Strecke (B 49). Zwar war die Unfallkostenrate an diesem teilplanfreien Knotenpunkt etwas höher als an dem teilplangleichen Knotenpunkt der B 10, jedoch nur halb so hoch wie an der plangleichen Einmündung im Zuge der gleichen 2+1-Strecke. Auch an dem teilplanfreien Knotenpunkt an der B 49 traten nur wenige Unfälle durch ein- und ausfahrende Fahrzeuge auf. Wie auch schon der teilplanfreie Knotenpunkt an der B 10, weist auch noch der Knotenpunkt an der B 49 im Vergleich zu anderen von KÖLLE betrachteten teilplanfreien Knotenpunkten ein relativ hohes Sicherheitsniveau auf.

Fazit

Auf der Grundlage der Untersuchung von KÖLLE zeigt sich, dass teilplanfreie Knotenpunkte im Zuge von 2+1-Strecken beim Vergleich mit anderen Knotenpunktarten im Zuge von 2+1-Strecken, aber auch mit anderen teilplanfreien Knotenpunkten im Zuge von zweistreifigen Landstraßen eine deutlich höheres Sicherheitsniveau aufweisen.

WEBER und LÖHE (2003) empfehlen in ihrer Forschungsarbeit für Strecken, die für den allgemeinen Verkehr freigegeben sind, für die Überholabschnitte eine Mindestlänge von 1.000 m. Die im Rahmen ihrer Untersuchung durchgeführte Unfallanalyse ergab, dass die Unfallbelastung auf kurzen Abschnitten, die nicht länger als 1.000 m waren, verglichen mit Abschnitten > 1.000 m überproportional hoch ist. Vorrangiges Ziel der Arbeit von WEBER und LÖHE waren jedoch Untersuchungen über die Auswirkungen einer Freigabe für den allgemeinen Verkehr. Die Analyse des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit an sieben Untersuchungsstrecken mit einem DTV zwischen 10.000 und 16.500 Kfz/24h zeigte keine Argumente, die gegen eine Freigabe sprechen. Im Rahmen von 24-stündigen Messungen lag der Anteil an landwirtschaftlichen Fahrzeugen und an Fahrrädern bei 0,05 % bis 0,96 %. Dabei konnten landwirtschaftliche Fahrzeuge als Pulkführer bzw. als Verursacher längerer Fahrzeugschlangen nicht beobachtet werden. Einen größeren Einfluss als die Art der Freigabe sehen WEBER und LÖHE hingegen im Ausbaustandard der Strecken. Die Untersuchungen zeigen, dass sich eine gestreckte Linienführung in Kombination mit teilplanfreien Knotenpunkten nicht nur hinsichtlich eines gleichmäßigen Geschwindigkeitsniveaus positiv auswirkt (vgl. Ziffer 2.3.3), sondern auch durch eine niedrige Unfallkostenrate.

Fazit

Die Arbeit von WEBER und LÖHE liefert einen Hinweis auf eine aus Sicherheitsgründen festzulegende Mindestlänge der Überholabschnitte.

Im Hinblick auf die Freigabe für den allgemeinen Verkehr, konnten WEBER und LÖHE zwar keine Hinweise erarbeiten, die aus Gründen der Verkehrssicherheit gegen eine solche Freigabe sprechen, jedoch gilt es zu beachten, dass der Anteil an landwirtschaftlichen Fahrzeugen als gering und an Fahrrädern als marginal auf den untersuchten Strecken zu bewerten ist.

Im Hinblick auf die Knotenpunktart bestätigen die Ergebnisse von WEBER und LÖHE die auf Grundlage der Untersuchung von KÖLLE gewonnenen Erkenntnisse.

Im Hinblick auf Sperrflächenüberfahrten kamen schon MEEWES und MAIER (1984) zu der Erkenntnis, dass es sich hierbei um äußerst seltene Ereignisse handelt. Bei fast 56.000 Fahrzeugbewegungen während ihres Untersuchungszeitraums überfahren lediglich 0,26 % der Kraftfahrzeuge die Sperrfläche am Ende um mehr als die Hälfte. Ihre Beobachtungen haben gezeigt, dass diese Missachtungen der Verkehrsregeln von den Kraftfahrern offensichtlich bewusst in Kauf genommen wurden, um noch „schnell“ (ein) langsame(s) Fahrzeug(e) zu überholen. Durchschnittlich beobachteten MEEWES und MAIER etwa 0,6 Sperrflächenüberfahrten (hier: Überfahren um mehr als die Hälfte der Sperrflächenlänge) pro Stunde. Häufiger als zweimal in der Stunde wird die Sperrfläche nur in 4,5 % der insgesamt 251 betrachteten Untersuchungsstunden überfahren.

BRANNOLTE, BASELAU und DONG machten einen Einfluss der geographischen Lage der Untersuchungsstrecken aus. So wurden beispielsweise auf der B 3 (Niedersachsen) wesentlich mehr Sperrflächenüberfahrten registriert als auf der B 33 (Baden-Württemberg).

In seiner Diplomarbeit aus dem Jahre 2006 betrachtete JÄHRIG u.a. die Anzahl der Sperrflächenüberfahrten auf einem Abschnitt mit dem RQ 11,5+ (vgl. Bild 2.5)².

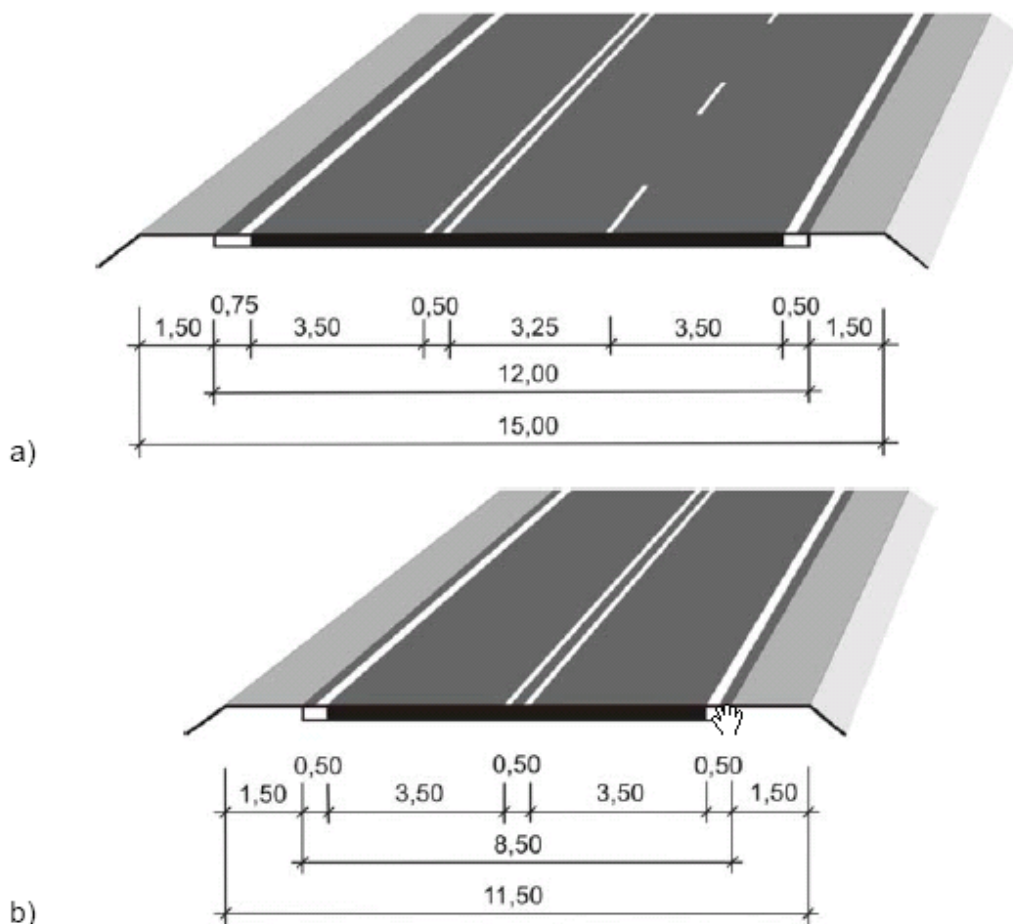


Bild 2.5: RQ 11,5+ gemäß den neuen, in der Erarbeitung befindlichen Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL, FGSV, 2007); a) mit Überholfahrstreifen; b) ohne Überholfahrstreifen mit Überholverbot

² Im Gegensatz zum RQ 15,5 handelt es sich beim RQ 11,5+ um einen einbahnig zweistreifigen Querschnitt der durch einzelne Überholfahrstreifen abschnittsweise dreistreifig aufgeweitet wird.

JÄHRIG konnte dabei einen Zusammenhang zwischen der (durchschnittlichen) Verkehrsstärke und der Anzahl der Sperrflächenüberfahrten (Anz_SpÜ) nachweisen. Mit einem Bestimmtheitsmaß (R^2) von 64,6 % kann demnach bei einem 550 m langen RQ 11,5+ die Anzahl der Sperrflächenüberfahrten mit Hilfe folgender Gleichung bestimmt werden:

Gleichung 2.1: $\text{Anz_SpÜ [1/h]} = 0,0124 \cdot q [\text{Kfz/h und Richtung}] + 1,264 \quad (R^2 = 0,6457)$

Fazit

Sperrflächenüberfahrten beim kritischen Wechsel sind auf 2+1-Strecken ein seltenes Ereignis.

Erste Untersuchungen von JÄHRIG haben gezeigt, dass auf den vergleichsweise kürzeren Überholabschnitten des RQ 11,5+ (hier: 550 m) bereits ab (durchschnittlichen) Verkehrsstärken von etwa 200 Kfz/h und Richtung 5 Sperrflächenüberfahrten in der Stunde zu erwarten sind (SV-Anteil: 20%).

2.5 Untersuchungen zum Überholverhalten

2.5.1 Allgemeines

Zuerst soll der Begriff „Überholung“ erläutert werden. Nach den Begriffsbestimmungen der FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßENWESEN (FGSV, 2000) ist eine Überholung definiert als „Vertauschung der Reihenfolge zweier sich in gleicher Richtung auf einer Fahrbahn bewegender Fahrzeuge“. Diese relativ simple Beschreibung wurde von NETZER im Jahre 1966 für einbahnig zweistreifige Außerortsstraßen spezifiziert: „Eine Überholung liegt dann vor, wenn ein Verkehrsteilnehmer einen auf der gleichen Spur und in gleicher Richtung sich bewegendem langsameren Verkehrsteilnehmer einholt, bei Erreichen des Ausbiegeabstands durch einen S-Bogen eine seitliche Versetzung ausführt, um zu Überholenden auf der links von der ursprünglichen Spur befindlichen Parallelspur vorbeifährt und nach einem zweiten S-Bogen wieder auf die ursprüngliche Spur zurückkehrt.“ Für 2+1-Strecken muss diese Definition jedoch modifiziert und erweitert werden: Eine Überholung liegt dann vor, wenn ein Verkehrsteilnehmer einen auf dem gleichen Fahrstreifen und in gleicher Richtung sich bewegendem langsameren Verkehrsteilnehmer einholt, bei Erreichen des Ausbiegeabstands durch einen S-Bogen eine seitliche Versetzung ausführt (Ausscheren), auf dem linken Fahrstreifen an dem auf dem rechten Fahrstreifen zu Überholenden innerhalb eines Überholabschnitts vorbeifährt und nach einem zweiten S-Bogen wieder auf den rechten Fahrstreifen zurückkehrt (Einscheren). Wenn sich das überholende Fahrzeug bereits auf dem Überholfahrstreifen befindet, da es z.B. bereits ein anderes Fahrzeug überholt hat oder der Überholabschnitt in einem teilplanfreien Knotenpunkt mit einer Fahrstreifenaddition beginnt (vgl. Bild 3.1), geht einer Überholung nicht zwangsläufig ein Ausscheren voraus. Dementsprechend endet eine Überholung auch nicht zwangsläufig mit dem Einscheren des überholenden Fahrzeugs, wenn es z.B. noch weitere Fahrzeuge überholt. Eine Überholung ist immer Bestandteil eines Überholvorgangs.

Ein Überholvorgang besteht mindestens aus einer, kann aber auch aus mehreren Überholungen bestehen. Nach BITZL (1966), NETZER (1966) sowie STEIERWALD, JACOBS und FEIER (1986) (vgl. DURTH und HABERMEHL, 1986) kann der Überholvorgang auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen vier verschiedenen Überholtypen zugeordnet werden:

Typ 1: Einfachüberholung:	Genau ein Fahrzeug überholt ein vorausfahrendes Fahrzeug
Typ 2: Aktive Mehrfachüberholung:	Genau ein Fahrzeug überholt mehrere Fahrzeuge innerhalb einer Zeitlücke
Typ 3: Passive Mehrfachüberholung:	Mehrere Fahrzeuge überholen ein Fahrzeug in der gleichen Zeitlücke
Typ 4: Doppelüberholung:	Ein oder mehrere Fahrzeuge überholen ein oder mehrere Fahrzeuge

STEIERWALD, JACOBS und FEIER sowie WILSON und BEST (1982) unterscheiden nach DURTH und HABERMEHL den Überholvorgang auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen weiterhin nach der Geschwindigkeit und dem Beschleunigungsvermögen in zwei Überholarten:

(1) Fliegende Überholung

Zwei Fahrzeuge bewegen sich jeweils mit konstanter, aber unterschiedlicher Geschwindigkeit. „Bedingt durch die Geschwindigkeitsdifferenz wird das langsamere Fahrzeug überholt.“

(2) Beschleunigte Überholung

Der Überholende und das zu überholende Fahrzeug bewegen sich mit der gleichen konstanten Ausgangsgeschwindigkeit fort. „Bei einer sich bietenden Überholmöglichkeit beschleunigt das nachfolgende Fahrzeug (der Überholende) und überholt das vorausfahrende Fahrzeug. Der so Überholte fährt indes mit gleich bleibender Geschwindigkeit, während er überholt wird, weiter.“

Auf 2+1 Strecken treten nur die Überholtypen 1 und 4 auf, da hier keine Zeitlücken beachtet werden müssen. Durch die Pulkbildung in den einstreifigen Vorlaufstrecken wird am Beginn eines Überholabschnitts i.d.R. immer die beschleunigte Überholung (Überholart 2), innerhalb des Überholabschnitts i.d.R. die fliegende Überholung (Überholart 1) durchgeführt.

In Anlehnung an NETZER sowie STEIERWALD, JACOBS und FEIER teilen DURTH und HABERMEHL den Überholvorgang in fünf Phasen auf:

Phase 1: Zwei Fahrzeuge befinden sich hintereinander auf dem gleichen Fahrstreifen. Das Nachfolgende muss gegebenenfalls seine Geschwindigkeit der des Vorausfahrenden anpassen.

Phase 2: Das nachfolgende Fahrzeug schert aus. Nach DURTH und HABERMEHL beginnt diese Phase, sobald das Fahrzeug sich näher als 25 cm zur Leitlinie bewegt. Mit dem Erreichen des Überholfahrstreifens endet diese Phase.

Phase 3: Der Überholende passiert das zu überholende Fahrzeug und verbleibt auf dem Überholfahrstreifen bis zwischen ihm und dem Überholten ein Sicherheitsabstand vorhanden ist.

Phase 4: Der Überholende schert ein. Das Einscheren endet mit dem Erreichen des in Fahrtrichtung rechten Fahrstreifens.

Phase 5: Beschreibt die Phase nach dem Überholen. Die beteiligten Fahrzeuge setzen ohne Geschwindigkeitsbeeinflussung ihre Fahrt fort.

Auf einbahnig zweistreifigen Landstraßen beginnt ein Überholvorgang somit i.d.R. immer mit dem Ausscheren und endet mit dem Einscheren des überholenden Fahrzeugs. Auf 2+1-Strecken kann jedoch bei Untersuchungsabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, u.U. das Ausscheren entfallen, da das zu überholende Fahrzeug (i.d.R. der Pulkführer) am Beginn des Überholabschnitts vom linken auf den rechten Fahrstreifen wechselt. Ein aus dem Durchgangsstrom überholendes Fahrzeug braucht daher nicht auszuscheren, sondern kann auf dem linken Fahrstreifen bleiben, um den Pulkführer zu überholen.

2.5.2 Überholverhalten und Pulkanalyse auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen

Die erste empirische Untersuchung des Überholvorgangs wurde in Deutschland von BITZL und NETZER im Jahre 1966 vorgestellt. Grundlage der Untersuchung waren 334 vollständig erfasste Überholvorgänge. Die Ergebnisse dieser und weiterer Untersuchungen aus dem In- und Ausland sind in DURTH und HABERMEHL aufgeführt. Hervorzuheben gilt ein Ergebnis von BITZL und NETZER. Von Ihnen wurde festgestellt, dass die mittleren Überholwege bei Gegenverkehr um etwa 12 % kürzer sind als ohne Gegenverkehr. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Überholten ergibt sich der mittlere Überholweg nach Gleichung 2.2 (ohne Gegenverkehr) bzw. Gleichung 2.3 (mit Gegenverkehr):

Gleichung 2.2: Überholweg (ohne Gegenverkehr) = $182,40 + 1,40 \cdot V_{\text{Überholter}}$ ($R^2 = 0,553$)

Gleichung 2.3: Überholweg (mit Gegenverkehr) = $156,89 + 1,296 \cdot V_{\text{Überholter}}$ ($R^2 = 0,681$)

GRABE und STOLZ konnten 1968 ebenfalls zeigen, dass die mittleren Überholwege geschwindigkeitsabhängig sind. Und, dass für 95 % aller Pkw-Pkw-Überholungen der

$$\text{Überholweg} < 109 + 1,77 \cdot V_{\text{Überholter}}$$

beträgt.

DURTH und HABERMEHL ihrerseits konnten ebenfalls eine Abhängigkeit des Überholwegs von der Geschwindigkeit des überholten Fahrzeugs ($V_{\text{Überholter}}$) nachweisen. Für eine Bemessung stellen sie eine Gleichung für eine Regressionsgerade auf, nach der 85 % aller Überholwege berücksichtigt werden (vgl. Gleichung 2.4).

Gleichung 2.4: 85 %-Häufigkeit der Überholwege = $114,05 + 1,58 \cdot V_{\text{Überholter}}$ ($R^2 = 0,706$)

Die Untersuchungen zum Überholverhalten gehen einher mit einer Pulkanalyse. Durch fehlende Überholsichtweiten oder zu starken Gegenverkehr und den daraus resultierenden kleinen Zeitlücken, kommt es auf einbahnigen, zweistreifigen Straßen i.d.R. zur Pulkbildung. Schnellere Fahrzeuge fahren auf langsamere Fahrzeuge auf, können diese aus den zuvor genannten Gründen nicht überholen und demnach auch nicht mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren. Die Pulkbildung, d.h. das Entstehen von Pulks, basiert demzufolge insbesondere auf den Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den einzelnen Fahrzeugen. Dies gilt sowohl auf einbahnigen, zweistreifigen wie auch dreistreifigen Straßen (vgl. auch Ziffer 2.5.3).

Bei der Pulkanalyse steht an erster Stelle die Festlegung, wie ein Pulk definiert ist. In der Literatur lassen sich mehrere unterschiedliche Definitionen finden. Es lassen sich jedoch auch einige Gemeinsamkeiten identifizieren. Alle Autoren beschreiben einen Fahrzeugpulk als eine hintereinander fahrende Reihe von Fahrzeugen, die durch ein vorausfahrendes Fahrzeug aufgehalten werden. Somit werden diese Fahrzeuge daran gehindert, sich mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fortzubewegen. Das vorausfahrende Fahrzeug wird dabei als Pulkführer bezeichnet und

gilt dem Pulk als nicht zugehörig. Nahezu alle Autoren führen an, dass ein nachfolgendes Fahrzeug nur einen bestimmten maximalen zeitlichen Abstand zu seinem Vorauffahrenden haben darf, um als dem Pulk zugehörig zu gelten. Der Unterschied zwischen den verschiedenen Autoren liegt in der Festlegung dieser maximalen Zeitlücke zwischen zwei aufeinander folgenden Pulkfahrzeugen. Die Angaben differieren dabei zwischen 2 und 11 Sekunden, wobei sich einige Autoren auf die Brutto- andere auf die Nettozeitlücke beziehen. Weitere Autoren führen auch die Weglücke oder die Geschwindigkeitsdifferenz zweier aufeinander folgender Fahrzeuge als Kriterium heran. Schließlich findet man auch noch psycho-physische Aspekte, die bei der Pulkdefinition herangezogen werden (vgl. LENZ und STEINHOFF, 1976). Einen Überblick über die verschiedenen Pulkdefinitionen enthält die Arbeit von ROOS aus dem Jahre 1989.

Bereits 1965 befasste sich DIETRICH in einem Fachartikel mit „Kolonnenbildung und Überholverhalten“ und gibt u.a. den „Behinderungsgrad des Verkehrs“ auf zweistreifigen Straßen durch die Kolonnenbildung an. Als Beurteilungskriterium verwendet er ein von ihm definiertes „Pulkgewicht“ P_k in Abhängigkeit von der „Anzahl der Fahrzeuge in der Kolonne“ k , der Zeitlücke zwischen den einzelnen Kolonnenfahrzeugen Δt sowie der mittleren Kolonnengeschwindigkeit V_m (vgl. Gleichung 2.5). Ein Fahrzeugpaar gilt dabei als unbehindert, d.h. einem Pulk nicht zugehörig, wenn die Zeitlücke $\Delta t \geq 9$ s oder $V_m > 100$ km/h ist.

Gleichung 2.5: $P_k = k^2/V_m \cdot (9 - \Delta t)/\Delta t$

Da jedoch keine Angaben zu Δt und V_m dem Fachartikel von DIETRICH entnommen werden können, kann k (in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke) nicht bestimmt werden. Als Ergebnis von DIETRICH kann daher hier einzig angeführt werden, dass bei der von ihm betrachteten „idealen Zweispurstraße“ bei einer Verkehrsmenge von etwa 1.000 Fz/h eine deutliche Zunahme der Behinderung, gekennzeichnet durch die Summe der Kolonnengewichte pro Stunde ($\sum P_k/h$), feststellbar ist.

Bei seinen „Untersuchungen über den Verkehrsablauf auf Landstraßen“ aus dem Jahre 1971 wurde von TRAPP auch die Kolonnenbildung betrachtet. Im Gegensatz zu DIETRICH definierte TRAPP einen Pulk wie folgt: „Eine Kolonne besteht dann, wenn drei oder mehr Fahrzeuge so hintereinander fahren, dass der Abstand $\Delta t \leq 7$ s wird.“ TRAPP entwickelte ein (äußerst umfangreiches) Modell, mit dem der Anteil der Kolonnenfahrzeuge K_v ermittelt werden kann (vgl. Gleichung 2.6).

Gleichung 2.6:

$$K_v = -8,51 - 773,41/V_0 + 2,228 \sqrt{x_1} - 4,911 x_1^2 \cdot 10^{-6} + 2,212 \cdot (x_1 - 800)^2 \cdot 10^{-5} - 1,731 \cdot (x_1 + 2000)^{0,25} + x_1^{0,25} \cdot (0,617 \sqrt{x_2} + 0,127 \sqrt{x_1} + 0,0141 \cdot (x_{10} + 1,5)^2 \cdot \sqrt{x_2} + 0,00971 \cdot x_5) - 15,48 \cdot x_8/x_1 - 9,478 \cdot (x_1 - 1000)^2 \cdot 10^{-6}$$

mit:

V_0 =	streckencharakteristische Geschwindigkeit	[km/h]
x_1 =	Verkehrsmenge in Fahrtrichtung	[Fz/h]
x_{1^*} =	Verkehrsmenge des Gegenverkehrs	[Fz/h]
x_2 =	SV-Anteil in Fahrtrichtung	[%]
x_5 =	Kurvigkeit	[gon/km]
x_8 =	Streckenanteil mit Sichtweiten ≥ 300 m	[%]
x_{10} =	Längsneigung	[%]

Beispiel:

$$V_0 = 110 \text{ [km/h]}$$

$$x_1 = 500 \text{ [Fz/h]}$$

$$x_{1^*} = 100 \text{ [Fz/h]}$$

$$x_2 = 5 \text{ [%]}$$

$$x_5 = 75 \text{ [gon/km]}$$

$$x_8 = 50 \text{ [%]}$$

$$x_{10} = +2 \text{ [%]}$$

In Gleichung 2.6: $K_V = 37 \text{ %}$

FROST, KELLER und KIRCHHOFF führten in ihren „Untersuchungen von Zwischenquerschnitten in Bayern“ (1989) u.a. auch Pulkbeobachtungen an einem b2-Querschnitt durch. Dabei definierten sie einen Pulk anhand der Grenzzeitlücke $t_{\text{Grenz}} = 2 \text{ s}$ und der Differenzgeschwindigkeit zwischen dem Vorausfahrendem (1) und dem nachfolgendem Fahrzeug (2) $\Delta V < 0,1 \cdot V_1$. FROST, KELLER und KIRCHHOFF führen an, dass der Pulkanteil im „hohen Maße neben Verkehrsstärke und dem SV-Anteil von den Überholmöglichkeiten“ bestimmt wird. Die nachfolgend beschriebenen Erkenntnisse von FROST, KELLER und KIRCHHOFF basieren auf den in 30 Minutenintervallen erhobenen Kenngrößen.

- Bei einer Verkehrsstärke von 600 Kfz/h und Richtung beträgt der Pulkanteil auf einem konventionellen b2-Querschnitt aufgrund mangelnder Überholmöglichkeiten 47 %.
- Bei etwa 900 Kfz/h und Richtung beträgt der Pulkanteil ca. 50 %. D.h., dass sich ab dieser Verkehrsstärke mehr als die Hälfte aller Fahrzeuge in einem Pulk befinden.

Im Jahre 1996 betrachteten KAYSER und STRUIF verschiedene „Maßnahmen zur Beeinflussung des Überholverhaltens“. Als Maßzahl für den Überholdruck wurden von KAYSER und STRUIF auch die „behindert fahrenden Fahrzeuge“ ermittelt. Als Pulkkriterium verwendeten sie dabei in Analogie zu FROST, KELLER und KIRCHHOFF:

- Die Bruttozeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug ist kleiner oder gleich 2 s.
- Die max. ΔV zwischen den aufeinander folgenden Fahrzeugen ist kleiner als 10 % des Vorausfahrenden: $\Delta V < 0,1 \cdot V_1$

Auf Basis dieser Pulkdefinition stellten KAYSER und STRUIF einen linearen Zusammenhang zwischen der „Verkehrsstärke in Fahrtrichtung“ und der „Anzahl der Pulkfahrzeuge“ auf. Demnach findet eine Pulkbildung überhaupt erst ab einer Verkehrsstärke in Fahrtrichtung von 100 Kfz/h statt. Es befinden sich beispielsweise aber 50 Fahrzeuge in einem Pulk, wenn die Verkehrsstärke in Fahrtrichtung 250 Kfz/h beträgt. Dies entspricht einem Pulkanteil von 20 %. Zu beachten ist, dass diese Daten auf einem Streckenabschnitt erhoben wurden, bei dem die vorhandene Überholstrecke aufgrund einer „lang gezogenen Kurve und der bewegten Topographie an jeder Stelle kleiner als 600 m“ war. Als zusätzliches Merkmal gilt weiterhin, dass mittels Markierung einer „Warnlinie“ sowie einer Beschilderung im Seitenraum auf eine „gute Überholmöglichkeit“ in 1.500, 1.000 bzw. 500 m hingewiesen wurde.

CARLSON, MILES und JOHNSON stellen in einem Fachartikel aus dem Jahre 2006 ihre Untersuchungen zu den Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Überholten und Überholenden auf einer zweistreifigen Landstraße in den USA vor. Die Autoren führen dann einen Vergleich mit dem in den USA derzeit gültigem Überholstreckenmodell durch. Dieses Modell berechnet die erforderliche Überholstrecke ausgehend von einer konstanten Geschwindigkeitsdifferenz von 10 mph ($\approx 15 \text{ km/h}$) zwischen den Überholten und den Überholenden. CARLSON, MILES und JOHNSON kommen jedoch zu der Erkenntnis, dass diese Geschwindigkeitsdifferenz eine stochasti-

sche Größe ist. Sie geben die Empfehlung, aufbauend auf weiteren Untersuchungen das Haltesichtweitenmodell flexibler zu gestalten, so dass der Planer eine Geschwindigkeit der Überholten wählen kann von der die Geschwindigkeit der Überholenden abhängt. Einen allgemeingültigen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Überholten und der der Überholenden konnten CARLSON, MILES und JOHNSON jedoch aufgrund ihres kleinen Untersuchungskollektivs nicht aufstellen. Es zeigte sich lediglich die Tendenz, dass sich mit zunehmender Geschwindigkeit der Überholten die (mittlere) Geschwindigkeitsdifferenz verringert.

2.5.3 Überholverhalten und Pulkanalyse auf 2+1-Strecken

Erste Untersuchungen zum Überholverhalten auf 2+1-Strecken von MEEWES und MAIER (1984) zeigten, dass bei mittleren Verkehrsstärken und einem hohen SV-Anteil die Zahl der Überholungen werktags gegenüber einem 2-streifigen Querschnitt mit einer Fahrstreifenbreite von 3,25 m (ehemalig: Querschnitt b2, vgl. Bild 2.1) deutlich sinkt. An Sonntagen wurde dagegen bei hohen Verkehrsstärken und geringem SV-Anteil ein Anstieg der Überholungen ermittelt. Bei geringen Verkehrsstärken wurde auf 2+1-Strecken weniger überholt als auf einer Strecke mit dem Querschnitt b2. Mehr Überholungen wurden dagegen beobachtet, wenn sowohl die Verkehrsstärke im Pkw-Verkehr als auch die Verkehrsstärke im Schwerverkehr anstieg.

Auch im Rahmen von Untersuchungen des Überholverhaltens an 2+1-Strecken stand häufig die Pulkanalyse im Mittelpunkt. LINDNER verwendet beispielsweise in einer Untersuchung aus dem Jahre 1988 aus Praktikabilitätsgründen und im Hinblick auf einen geringen Rechenaufwand eine Pulkdefinition nach Zeitlücken mit dem Zusatzkriterium einer maximal zulässigen Geschwindigkeitsdifferenz. Als kritische Brutto-Zeitlücke wurde von LINDNER zwei Sekunden gewählt, da unterhalb von zwei Sekunden nach seiner Auffassung „mit Sicherheit von beeinflusster Fahrweise ausgegangen werden kann.“ Mit dieser Pulkdefinition stellt LINDNER Abhängigkeiten zwischen der Verkehrsstärke und der Anzahl der Fahrzeuge in der Fahrzeugschlange fest. Das Bild 2.6 zeigt den ermittelten Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der mittleren Pulklänge zu Beginn und am Ende des Überholabschnitts.

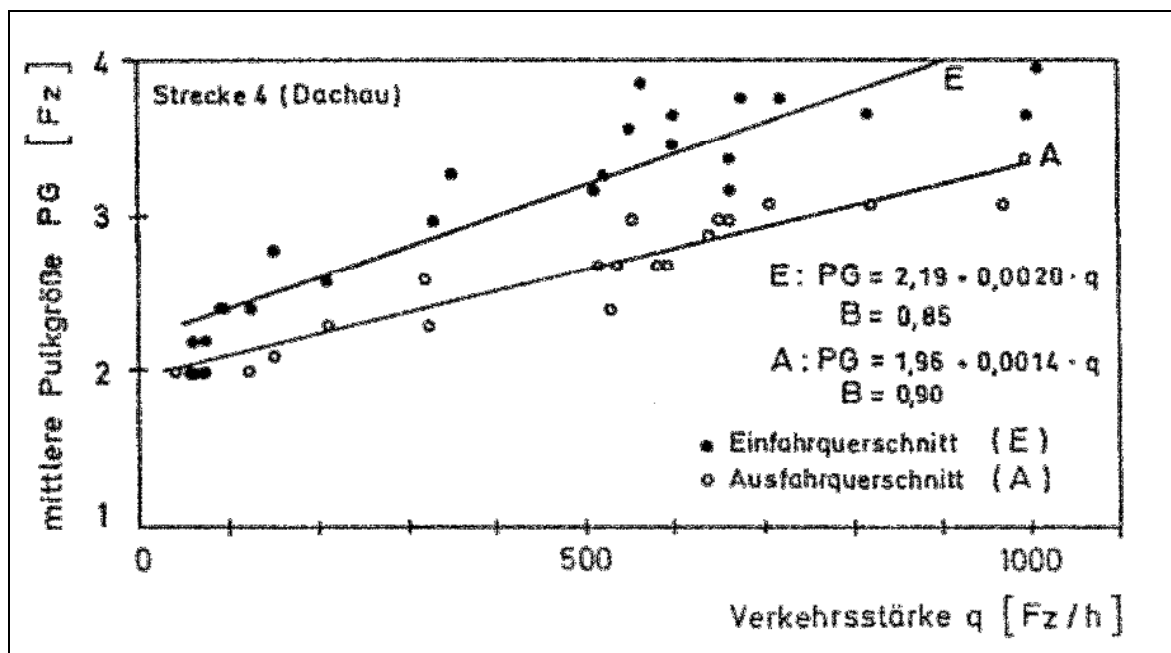


Bild 2.6: Zusammenhang zwischen der mittleren Pulklänge und der Verkehrsstärke LINDNER (1988)

LINDNER stellt weiter fest, dass der SV-Anteil keinen entscheidenden Einfluss auf die Abnahme der Pulkängen innerhalb des Überholabschnitts ausübt. Die im Bild 2.6 dargestellten Pulkängen am Ende des Überholabschnitts (Ausfahrquerschnitt) resultieren aus Pulkneubildungen innerhalb des Überholabschnitts. Ein wesentliches Ergebnis von LINDNER ist, dass sich 50 % aller auftretenden Pulks innerhalb der ersten 1.000 m auflösen.

Die bereits unter Ziffer 2.5.2 beschriebenen Pulkbeobachtungen von FROST, KELLER und KIRCHHOFF (1989) führten an den einstreifigen Vorlaufstrecken innerhalb einer 2+1-Strecke (absolutes Überholverbot durch Zeichen 295 der StVO als Doppellinie) zu folgenden Erkenntnissen:

- Bei einer Verkehrsstärke von 600 Kfz/h und Richtung beträgt der Pulkanteil auf einer einstreifigen Vorlaufstrecke innerhalb einer 2+1-Strecke 37 %.
- Bemerkenswert ist, dass die von FROST, KELLER, KIRCHHOFF ermittelten Zusammenhänge zwischen der Verkehrsstärke und dem Pulkanteil in Abhängigkeit vom Querschnitt dazu führen, dass ab etwa einer Verkehrsstärke von 900 Kfz/h und Richtung der Pulkanteil auf den einstreifigen Vorlaufstrecken innerhalb einer 2+1-Strecke größer ist als der auf einem konventionellen b2-Querschnitt.
- Bei etwa 900 Kfz/h und Richtung beträgt der Pulkanteil bei beiden Querschnitten ca. 50 %. D.h., dass sich ab dieser Verkehrsstärke mehr als die Hälfte aller Fahrzeuge in einem Pulk befinden.

ROOS untersuchte in seiner Forschungsarbeit aus dem Jahre 1989 ebenfalls Pulks im Zuge von 2+1-Strecken. Auf der Grundlage von empirischen Untersuchungen an zwei Strecken mit sechs einstreifigen Abschnitten zur Pulkbildung und theoretischen Modellen zur Pulkauflösung wurden die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussfaktoren quantitativ bestimmt.

Einen Pulk definierte ROOS bei seiner Untersuchung in Anlehnung an DIETRICH (1965) sowie TRAPP und KRAUS (1983) wie folgt:

Ein Fahrzeug ist einem Pulk zugehörig, wenn die Bruttozeitlücke zu dem vor ihm fahrenden Fahrzeug im Pulk oder zum Pulkführer weniger als 3 s beträgt. Die Geschwindigkeit des Pulkführers darf dabei 90 km/h nicht überschreiten. Der Pulkführer selbst gehört nicht zum Pulk. (Pulkdefinition A)

Mittels Induktionsschleifen am Ende der einstreifigen Abschnitte untersuchte ROOS die Pulkbildung innerhalb von 2+1-Strecken (absolutes Überholverbot, Zeichen 295 der StVO als Doppellinie).

Es zeigte sich, dass sich die Pulks in der Regel im ersten Drittel der einstreifigen Abschnitte (die sich innerhalb der 2+1-Strecke befinden) bilden. Nach ROOS üben dabei zwei Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Pulkbildung aus. Dies sind die Länge der einstreifigen Vorlaufstrecken (die sich innerhalb der 2+1-Strecke befinden) sowie die Verkehrsstärke.

ROOS konnte einen Zusammenhang zwischen dem Pulkanteil, dem SV-Anteil und der Verkehrsstärke nachweisen. Mittels eines logarithmischen Regressionsansatzes konnte er den Anstieg des Pulkanteils bei zunehmenden Verkehrsstärken beschreiben. Nach ROOS stellt der Pulkanteil ein Maß für die Qualität des Verkehrsablaufs dar. Quadrant B in Bild 2.7 dient daher lediglich zu einer Einschätzung der Verkehrsqualität und wird für das von ROOS im weiteren Verlauf seiner Arbeit entwickelte Verfahren zur Bestimmung der erforderlichen Abschnittslänge der Überholabschnitte von 2+1-Strecken nicht verwendet.

Bei den empirischen Untersuchungen zum Überholverhalten beschränkte ROOS sich auf Beobachtungen des Ausscherverhaltens am Beginn von zwei Überholabschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel auf freier Strecke, d.h. außerhalb von Knotenpunkten begannen. Eine Beobachtung des gesamten Überholabschnitts fand nicht statt.

Das Modell zur Beschreibung der Pulkauflösung basiert somit auf einem theoretischen Ansatz, der keinen Knotenpunkteinfluss oder die Ausbildung des Beginns als Fahrstreifenaddition (vgl. Ziffer 3, insbes. Bild 3.1) berücksichtigt. Zur Bestimmung der erforderlichen Länge eines Überholabschnitts werden als Eingangsgrößen die Pulklänge, die Geschwindigkeit der Pulkführer und die Geschwindigkeit der überholenden Fahrzeuge benötigt.

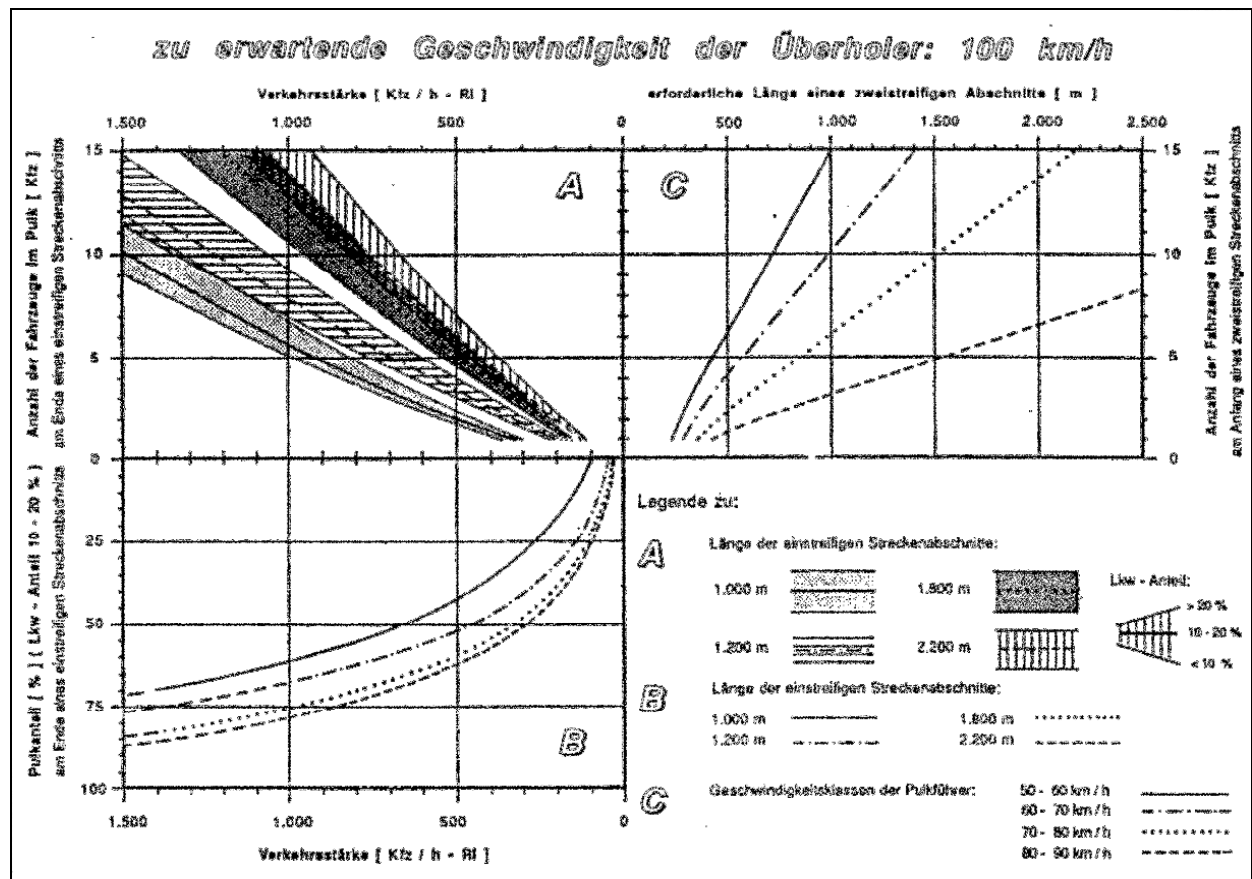


Bild 2.7: Nomogramm zur Abschätzung der erforderlichen Länge eines Überholabschnitts von 2+1-Strecken (Roos, 1989)

ROOS stellt für die Ermittlung der erforderlichen Länge eines Überholabschnitts zwei maßgebende Zusammenhänge auf:

1. Zusammenhang zwischen der Pulklänge, der Länge der Vorlaufstrecke und der Verkehrsstärke sowie
2. Zusammenhang zwischen der Pulklänge, der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Pulkführer und Überholenden sowie der erforderlichen Länge des Überholabschnitts.

Die beschriebenen Zusammenhänge wurden von ROOS in mehreren, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der überholenden Fahrzeuge variierenden Bemessungsnomogrammen zusammengefasst. In Bild 2.7 ist beispielhaft das Nomogramm für eine Geschwindigkeit von 100 km/h der überholenden Fahrzeuge dargestellt.

BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) konnten bei gleicher Pulkdefinition wie ROOS keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen dem Anteil der behinderten Fahrzeuge und der Verkehrsstärke ableiten. Bei ihrer auf die Gesamtstrecke bezogenen Untersuchung war lediglich die Tendenz zu erkennen, dass mit zunehmender Verkehrsstärke auch der Pulkanteil steigt.

Für ihre Betrachtungen zum Pulkverhalten kamen bei der Untersuchung von BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) zwei verschiedene Untersuchungsmethoden zur Anwendung. Zum einen erfolgte die Bestimmung von Pulks während Fahrzeug-Nachfahrten, zum anderen aus lokalen Beobachtungen. Auf Basis der geringen Stichprobe von Fahrzeug-Nachfahrten ließen sich aus dieser Beobachtungsmethode jedoch nur Tendenzen bezüglich der Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Pulks, der Pulklänge und den Reisegeschwindigkeiten formulieren.

Hinsichtlich der beobachteten Pulkängen wurde die Tendenz erkannt, dass sich bei Verkehrsstärken über 600 Kfz/h im einstreifigen Bereich Pulkängen von bis zu 15 Fahrzeugen ergeben können. Es konnten Zusammenschlüsse von Pulks beobachtet werden, die dadurch entstanden, dass „schnellere“ Pulks „langsamere“ Pulks innerhalb des einstreifigen Bereichs einholten. Die Weiterverfolgung dieser Pulks in den nachfolgenden zweistreifigen Abschnitten zeigte, dass sich diese Pulks i.d.R. nicht vollständig auflösten. Diese Beobachtung erfolgte unabhängig von der Abschnittslänge der Überholbereiche. Dabei variierten in der Untersuchung die Abschnittslängen mit einer Ausnahme zwischen 1.000 und 1.800 m. Weiterhin wurde mit zunehmender Verkehrsstärke ein Anwachsen der Pulkängen beobachtet.

Im Rahmen der lokalen Beobachtungen wurden die auftretenden Pulkängen kurz vor Beginn und am Ende der Untersuchungsstrecken hinsichtlich ihrer Vorkommenshäufigkeit analysiert. Dabei ist trotz der teilweise beobachteten längeren Pulks festzuhalten, dass Pulks, die aus mehr als drei Fahrzeugen bestehen, nur äußerst selten auftraten. Die wenigen längeren Pulks wurden überwiegend von Lkws angeführt. Weiterhin wurde die generelle Tendenz beobachtet, dass neben der Pulklänge auch die Gesamtanzahl von Pulks zwischen Streckenbeginn und Streckenende abnimmt. Weitere Zusammenhänge ließen sich aus dieser Auswertung nicht ableiten. Mögliche Einflüsse durch zunehmenden SV-Anteil, die Anzahl der Abschnitte oder den Betrieb als Kraftfahrstraße wurden entweder nicht analysiert oder konnten nicht nachgewiesen werden.

Eine im Jahre 2006 veröffentlichte US-amerikanische Untersuchung von GATTIS, BHAVE und DUNCAN befasst sich ebenfalls mit dem Überholverhalten auf 2+1-Strecken (in Arkansas). Ziel der Untersuchung war es, Empfehlungen für die Länge von Überholabschnitten in Abhängigkeit von der Pulkbildung, der Überholgeschwindigkeit und der Unfallkostenrate auf dem Überholfahrstreifen zu entwickeln.

In dieser Veröffentlichung wird auch auf bereits vorliegende US-amerikanische Erkenntnisse eingegangen, so wird beispielsweise auf eine Arbeit von HARWOOD ET. AL. (in GATTIS, BHAVE und DUNCAN, 2006) hingewiesen. HARWOOD ET. AL. ermittelten in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke die erforderliche Länge der Überholabschnitte (vgl. Tabelle 2.1).

Verkehrsstärke [Kfz/h und Richtung]	erforderliche Länge des Überholabschnitts [m]
< 200	400 – 1.200
200 – 700	1.600 -3.200

Tabelle 2.1: Erforderliche Länge des Überholabschnitts in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke nach HARWOOD ET. AL. (in GATTIS, BHAVE und DUNCAN, 2006)

HARWOOD ET. AL. geben zu bedenken, dass Längen > 1.600 m i.d.R. nicht über den ganzen Tag erforderlich seien. Sie schlagen daher vor, lieber mehrere kürzere Abschnitte als wenige Längere anzuordnen.

GATTIS, BHAVE und DUNCAN teilten ihre 4 Untersuchungsstrecken in 1,5 km lange Segmente ein, um die Pulkbildung an den jeweiligen Stationen zu erfassen. Station 1 entspricht dabei dem Beginn der 2+1-Strecke kurz vor der Einfahrt in den Überholabschnitt. Auf 3 der 4 relativ ebenen und geraden Untersuchungsstrecken konnte an 4 Stationen die Pulks erhoben werden. Die Daten wurden dabei zu 15 Minutenintervallen aggregiert und dann auf eine Stunde hochgerechnet. Ein Pulk liegt nach GATTIS, BHAVE und DUNCAN vor, wenn die Bruttozeitlücke zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen < 3 s beträgt.

GATTIS, BHAVE und DUNCAN konnten hochsignifikante und überwiegend gute Zusammenhänge (vgl. dazu Ziffer 6.6.4) zwischen der Verkehrsstärke und der Anzahl der Fahrzeuge in Pulks bzw. dem Pulkanteil nachweisen. Als wesentliches Ergebnis ihrer Untersuchung kann festgehalten werden, dass der Pulkanteil, nachdem auf den ersten 1,5 km die größte Pulkauflösung erfolgt, zum Ende hin wieder ansteigt. Jedoch steigt der Pulkanteil am Ende der Untersuchungsstrecke nicht wieder auf das Niveau des Beginns. Zu beachten ist, dass bei dieser Untersuchung keine Einflüsse aus der Vorlaufstreckenlänge und/ oder dem SV-Anteil berücksichtigt wurden.

GATTIS, BHAVE und DUNCAN analysierten auch die Geschwindigkeiten in den Überholabschnitten. Sie mussten dabei feststellen, dass sich die Geschwindigkeiten und deren Verlauf über die verschiedenen Untersuchungsstrecken unterscheiden. Sie führen dies darauf zurück, dass, wie bekannt, die Geschwindigkeiten von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden.

2.6 Dokumentation von 2+1-Strecken

Aus der Untersuchung von BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) und einer im Jahre 2000 durch die BAST durchgeführten Befragung bei den Straßenbauämtern lag eine Dokumentation von 2+1-Strecken in Deutschland vor, die für die Auswahl von Untersuchungsstrecken im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzt werden konnten. Auf der Grundlage dieser Informationen wurden die vorhandenen 2+1-Strecken zusammengestellt.

Eine in Teilbereichen aktualisierte Übersicht über die dokumentierten 2+1-Strecken in Deutschland befindet sich im Anhang unter Ziffer A 1 (Stand: 2000).

2.7 Fazit

Die Literaturanalyse zeigt, dass die Verkehrssicherheit und der Verkehrsablauf auf 2+1-Strecken in der Vergangenheit in mehreren Forschungsvorhaben untersucht wurde. Aus den vorliegenden Untersuchungen liegen somit umfangreiche empirische Daten vor.

Bezüglich der Freigabe von 2+1-Strecken für den allgemeinen Verkehr konnten die bestehenden Sicherheitsbedenken aufgrund von nur geringen Anteilen von landwirtschaftlichen Fahrzeugen bzw. marginalen Anteilen von Fahrrädern am Verkehrsaufkommen und dann daraus resultierenden niedrigen beobachteten Unfallzahlen nicht bestätigt werden.

Vor allem die im Rahmen der Entwicklung eines Bemessungsverfahrens für die Fortschreibung des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS, FGSV, 2001) erzielten Simulationsergebnisse haben jedoch einen deutlichen negativen Einfluss durch langsamen Verkehr auf die Qualität des Verkehrsablaufs aufgezeigt (vgl. BASELAU, 2006, BRANNOLTE, BASELAU und DONG, 2004). Das entwickelte Bemessungsverfahren ermöglicht zukünftig die Beur-

teilung der Qualität des Verkehrsablaufs in Abhängigkeit verschiedener entwurfstechnischer, betrieblicher und verkehrlicher Randbedingungen.

Die vorliegenden Erkenntnisse zum Überholverhalten und zur Pulkauflösung sind noch nicht ausreichend empirisch abgesichert. Aus diesem Grund bestehen nach wie vor Unsicherheiten bei der Festlegung der optimalen Abschnittslängen in Abhängigkeit von verkehrlichen Parametern. Eine Erweiterung dieser Erkenntnisse zum Überholverhalten und zur Pulkauflösung ist daher dringend erforderlich.

In den folgenden Ausführungen wird daher die Frage nach der Pulkauflösung als maßgebendes Kriterium für die Bestimmung der erforderlichen Abschnittslänge im Vordergrund stehen. Die Basis für ein durchgängiges Verfahren zur Bestimmung der optimalen Abschnittslänge bildet jedoch nach derzeitigem Kenntnisstand die Analyse der Pulkbildung, die somit ebenfalls Bestandteil dieser Untersuchung sein wird. Darüber hinaus werden weitere allgemeine Erkenntnisse bezüglich des Überhol- und des Geschwindigkeitsverhaltens sowie hinsichtlich der Verkehrssicherheit auf 2+1-Strecken erwartet.

Die zu gewinnenden Erkenntnisse sollen basierend auf einer umfangreichen empirischen Datengrundlage in Abhängigkeit von verkehrlichen Randbedingungen ermittelt werden. Dabei sollen auch unterschiedliche Ausführungsformen von 2+1-Strecken betrachtet werden.

3 Auswahl von Untersuchungsabschnitten

Für das Erreichen der in Ziffer 1.1 beschriebenen Zielsetzung ist es erforderlich, dass im Rahmen der empirischen Untersuchungen ein großes Verkehrsstärkespektrum erfasst wird. Um zu gewährleisten, dass hohe Verkehrsstärken beobachtet werden, sollen alle Untersuchungsabschnitte eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke von mindestens 13.000 Kfz/24h aufweisen. Durch die Wahl der Erhebungszeiträume während als auch außerhalb der Spitzenstunde wird gewährleistet, dass auch niedrige Verkehrsstärken erfasst werden (vgl. Ziffer 4.7).

Zurückliegende Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere auf Landstraßen das Verkehrsgeschehen durch eine Vielzahl von Einflüssen geprägt wird. Diese können verkehrlicher, entwurfstechnischer sowie betrieblicher Art sein und korrelieren teilweise untereinander. Dies macht es vielfach unmöglich, den Einfluss einzelner bzw. einiger ausgewählter Faktoren quantifizieren zu können. Um dies zu erreichen, sollten möglichst viele der potenziellen Einflüsse konstant gehalten werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die nachfolgend aufgeführten Merkmale bei allen Untersuchungsstrecken möglichst einheitlich sein:

1. Einsatz als Kraftfahrstraße oder die Freigabe für den allgemeinen Verkehr

Gemäß den RAS-Q 96 (FGSV, 1982) stellt der Betrieb als Kraftfahrstraße den Regelfall für 2+1-Strecken dar. Zwar hat die Arbeit von WEBER und LÖHE (2003) hinsichtlich der Verkehrssicherheit keine nachteiligen Erkenntnisse gegen ein Freigabe für den allgemeinen Verkehr geliefert, wie jedoch die Arbeit von BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) gezeigt hat, können schon wenige langsame Fahrzeuge einen deutlichen negativen Einfluss auf den Verkehrsablauf auf 2+1-Strecken ausüben. Dieser Umstand war dann auch ausschlaggebend für die neuen, in der Erarbeitung befindlichen Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL, FGSV, 2007). Auch hier wird der Betrieb als Kraftfahrstraße empfohlen. Alle für die empirischen Untersuchungen ausgewählten Untersuchungsabschnitte werden daher einheitlich als Kraftfahrstraßen betrieben.

2. Zulässige Höchstgeschwindigkeit

Auf allen Untersuchungsabschnitten ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 100 km/h beschränkt. Die Auswahl dieser Abschnitte kann als repräsentativ angesehen werden, da die meisten 2+1-Strecken in Deutschland diese zulässige Höchstgeschwindigkeit aufweisen.

3. Knotenpunktgrundform

Auch die Knotenpunktgrundform hat einen entscheidenden Einfluss auf den Verkehrsablauf auf Landstraßen (vgl. u.a. KÖLLE, 1999, MEEWES, 2006, STEINAUER, SCHUCKLIEß und BECHER, 2007). An 2+1-Strecken, die als Kraftfahrstraße betrieben werden, sind teilplanfreie Knotenpunkte häufig vertreten. 2+1-Strecken, die andere Knotenpunktgrundformen aufweisen, wurden bei der Auswahl der Untersuchungsabschnitte nicht berücksichtigt.

4. Längsneigung

Frühere Untersuchungen (insbesondere auch BRANNOLTE, BASELAU und DONG, 2004) sprechen größtenteils auch der Längsneigung einen entscheidenden Einfluss auf den Verkehrsablauf zu. Bei der Auswahl der Untersuchungsstrecken soll aus diesem Grund darauf geachtet werden, dass nur ebene Strecken mit einer Neigung zwischen $\pm 2\%$ berücksichtigt werden. Diese Auswahl kann ebenfalls als repräsentativ für 2+1-Strecken in Deutschland angesehen werden.

5. Kurvigkeit

Übereinstimmend wird in der Literatur (z.B. BUCK, 1992, FGSV, 1982, LIPPOLD, 1997) der Kurvigkeit ein maßgeblicher Einfluss auf den Verkehrsablauf zugesprochen. Da 2+1-Strecken i.d.R. zügig trassiert werden, soll die Kurvigkeit bei allen Untersuchungsabschnitten gering sein.

6. Charakteristik der Vorlaufstrecke

Für die Analyse der Pulkbildung ist eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Vorlaufstrecken erforderlich. Nach Möglichkeit sollten alle Vorlaufstrecken in Lage-, Höhenplan und Querschnitt ähnlich trassiert sein.

Um die beschriebene Zielsetzung der Arbeit zu erreichen, müssen verschiedene Parameter jedoch variieren. Dies sind im Einzelnen:

- (1) die Abschnittslängen,
- (2) die Ausbildung des Beginns des Überholabschnitts als unkritischer Wechsel (vgl. Bild 2.4) oder als Fahrstreifenaddition (vgl. Bild 3.1),
- (3) die Position des Abschnitts innerhalb der 2+1-Strecke und
- (4) der SV-Anteil.

(1) Das vorrangige Untersuchungsziel ist die Ermittlung der optimalen Abschnittslänge für den Abbau von Fahrzeugpulk in den Überholabschnitten einer 2+1-Strecke. Als Abschnittslänge wird die Länge zwischen den Sperrflächen am Anfang und am Ende des Überholabschnitts definiert. Im Falle einer Fahrstreifenaddition am Anfang eines Überholabschnitts wird als Bezugspunkt das Ende der Fahrstreifenbegrenzung (Zeichen 295 StVO) herangezogen. Um das Überholverhalten auf unterschiedlichen Abschnittslängen zu erfassen, sollen die 15 Untersuchungsabschnitte ein möglichst breites Spektrum an Längen abbilden. In Anlehnung an die RAS-Q 96 (FGSV, 1982) sollen die Abschnitte somit nach Möglichkeit zwischen 800 m und 2.000 m lang sein (vgl. Ziffer 2.2).

(2) Gemäß den RAS-Q 96 (FGSV, 1996) soll der Beginn eines Überholabschnitts als unkritischer Wechsel ausgeführt werden (vgl. Bild 2.4). Da es günstig ist, einen Querschnittswechsel an Knotenpunkten anzuordnen, ist in der Realität jedoch der Beginn eines Überholabschnitts häufig in einem teilplanfreien Knotenpunkt zu finden. Der Einfädelungstreifen wird dabei durch eine Fahrstreifenaddition zum rechten Fahrstreifen, die einstreifige Vorlaufstrecke zum linken Fahrstreifen des Überholabschnitts (vgl. Bild 3.1). Im Rahmen der Untersuchung werden daher sowohl Fahrstreifenadditionen als auch unkritische Wechsel betrachtet, um evtl. eine Empfehlung für die eine oder andere Ausbildungsform ableiten zu können.

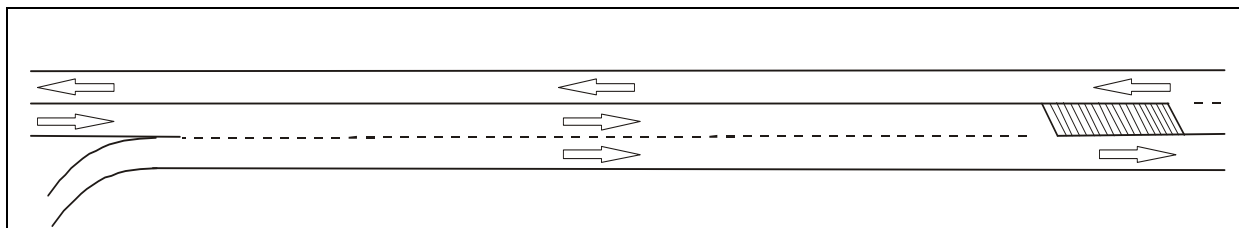


Bild 3.1: Beginn des Überholabschnitts mit einer Fahrstreifenaddition an einem teilplanfreien Knotenpunkt (PRIEMER, 2004)

Im Vergleich zu einem unkritischen Wechsel müssen bei einer Fahrstreifenaddition die Pulkführer auf dem Durchgangsstrom am Beginn der Überholabschnitte zunächst einen Fahrstreifenwechsel nach rechts vornehmen, bevor sie überholt werden können. Die hieraus resultierenden Auswirkungen auf den Abbau von Fahrzeugpulks sind Bestandteil dieser Untersuchung.

(3) In Abhängigkeit von der Position, in der sich der Untersuchungsabschnitt im Verlauf der gesamten 2+1-Strecke befindet, kommt es nach BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) zu unterschiedlichen Pkw-Reisegeschwindigkeiten. Des Weiteren kann es auch zu Unterschieden bezüglich der Pulkbildung kommen. Befindet sich ein Untersuchungsabschnitt am Beginn der 2+1-Strecke (Pos. 1), so kann die zugehörige Vorlaufstrecke (mit einem einbahnigen zweistreifigen Querschnitt) mehrere Kilometer lang sein. Bestehen auf dieser Strecke keine Überholmöglichkeiten, kann sich in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke und der Verkehrszusammensetzung eine Vielzahl von langen Pulks bilden. Überholabschnitten, die nicht an Pos. 1 liegen, gehen immer einstreifige Vorlaufstrecken voraus, auf denen ein Überholverbot angeordnet ist. Die Länge dieser Vorlaufstrecken entspricht der Länge des entsprechenden Überholabschnitts der Gegenrichtung zuzüglich der Länge der Sperrflächen zu Beginn und am Ende der Überholabschnitte. Nach den RAS-Q 96 (FGSV, 1996) sollen die Überholabschnitte eine Länge von 2.000 m nicht überschreiten (vgl. (1) bzw. Ziffer 2.2). Es werden sowohl Abschnitte, die an Pos. 1 liegen, als auch solche, die nicht an Pos. 1 liegen, in der Untersuchung unterschieden und berücksichtigt.

(4) Eine weitere wichtige Einflussgröße auf den Verkehrsablauf ist der SV-Anteil (FGSV, 1996). Es soll ein möglichst breites Spektrum abgedeckt werden, um den Einfluss des SV-Anteils auf das Überholverhalten und die Pulkbildung bestimmen zu können.

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen konstanten und variierenden Merkmale wurden 15 Untersuchungsabschnitte ausgewählt.

Bei der Auswahl wurde festgestellt, dass nur wenige Untersuchungsabschnitte mit einem unkritischen Wechsel beginnen. Die überwiegende Anzahl der Abschnitte beginnt mit einer Fahrstreifenaddition an einem teilplanfreien Knotenpunkt. Daher wurden nur vier mit einem unkritischen Wechsel beginnende Untersuchungsabschnitte in die Untersuchung einbezogen.

Ausschlaggebend für die abschließende Auswahl der Untersuchungsabschnitte war, dass für den Aufbau der Messeinrichtungen (Stative für die Kameras) ausreichende Aufstellflächen neben der Fahrbahn oder in Form von Überquerungsbauwerken vorhanden waren. Somit wurden bei gleicher Eignung schließlich diejenigen Untersuchungsabschnitte ausgewählt, bei denen die besten Voraussetzungen für den Aufbau der Messeinrichtungen gegeben waren.

Aus der bereits vorliegenden Streckendokumentation von BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) konnten erste Informationen über entwurfstechnische und betriebliche Merkmale zahlreicher 2+1-Strecken in Deutschland entnommen werden (vgl. Ziffer 2.6 sowie Anhang Ziffer A 1). Um jedoch sicher zu stellen, dass die potenziell in Frage kommenden Untersuchungsstrecken alle erforderlichen Randbedingungen erfüllen, wurde eine Bereisung durchgeführt. Dabei konnte gleichzeitig die Eignung der Untersuchungsabschnitte für den Messaufbau geprüft werden. Darüber hinaus war eine Verifizierung der vorhandenen Streckendokumentationen durch die während der Bereisung gesammelten Informationen möglich.

Eine Auflistung der abschließend ausgewählten Untersuchungsabschnitte enthält Tabelle 3.1. Ihr sind neben den Angaben zum DTV und zum SV-Anteil (aus BRANNOLTE, BASELAU und DONG, 2004 und LENSING, 2003) auch die Position innerhalb der 2+1-Strecke, die Art der Ausbildung des Beginns sowie die Längen der Überholabschnitte und ihrer zugehörigen Vorlaufstrecken zu entnehmen. Die Vorlaufstreckenlänge vor Überholabschnitten, die sich an Pos. 1 einer 2+1-Strecke befinden (d.h. Vorlaufstrecken außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke), wurde dabei zwischen dem Beginn des Überholabschnitts bis zu dem nächsten davor gelegenen Knotenpunkt bzw. der nächsten wesentlichen Änderung der Streckencharakteristik bestimmt. Eine Dokumentation, in der alle relevanten entwurfstechnischen und betrieblichen Randbedingungen beschrieben werden, befindet sich unter Ziffer A 2 im Anhang.

Elf der 15 Untersuchungsabschnitte beginnen mit einer Fahrstreifenaddition, vier mit einem unkritischen Wechsel. Die elf Abschnitte mit Fahrstreifenaddition decken ein Spektrum von Abschnittslängen zwischen etwa 800 m und 1.700 m ab. Die vier Abschnitte, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, weisen Längen zwischen etwa 900 m und 1.400 m auf. Sieben der untersuchten Überholabschnitte liegen am Beginn, d.h. an Pos. 1 der 2+1-Strecke. Demensprechend befinden sich auch die sieben dazugehörigen Vorlaufstrecken außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke. Acht der untersuchten Überholabschnitte sowie deren zugehörige Vorlaufstrecken liegen dagegen innerhalb einer 2+1-Strecke.

Die Forderung nach einer möglichst einheitlichen Charakteristik der Vorlaufstrecken konnte nur bedingt eingehalten werden. Bei den Vorlaufstrecken, die sich nicht an Pos. 1 befinden, kann aber größtenteils davon ausgegangen werden, dass die im Hinblick auf die Pulkbildung relevanten Merkmale annähernd vergleichbar sind. Bei den Vorlaufstrecken außerhalb der 2+1-Strecken ist eine Vergleichbarkeit im Hinblick auf die Pulkbildung i.d.R. jedoch nicht gegeben. Diesen Umstand gilt es bei der Analyse der Pulkbildung zu berücksichtigen.

Untersuchungs- abschnitt	OU = Ortsumgehung FR = Fahrtrichtung	Bundesland	Straße	DTV [Kfz/24]	SV-Anteil [%]	Position	Wechsel	Länge [m]	L _{Vorlauf} [m]
1	OU Jever, FR Wittmund	NI	B 210	13.00 0	8	1	FS- Add.	1.474	2.200
2	OU Jever, FR Wittmund	NI	B 210	13.00 0	8	2	FS- Add.	1.208	1.500
3	OU Jever, FR Wilhelmshaven	NI	B 210	13.00 0	8	2	FS- Add.	1.498	1.100
4	Kirchhain / Cölbe, FR Marburg	HE	B 62	13.00 0	8	1	FS- Add.	1.092	2.000
5	Kirchhain / Cölbe, FR Marburg	HE	B 62	13.00 0	8	2	FS- Add.	1.687	1.400
6	Kirchhain / Cölbe, FR Kirchhain	HE	B 62	13.00 0	8	1	FS- Add.	1.706	500
7	Paderb. / Schlangen, FR Horn-Bad Meinberg	NW	B 1	17.00 0	10	3	FS- Add.	828	1.800
8	Paderborn / Schlangen, FR Paderborn	NW	B 1	17.00 0	10	1	FS- Add.	1.403	3.500
9	Paderborn / Schlangen, FR Paderborn	NW	B 1	17.00 0	10	3	FS- Add.	1.195	1.400
10	Niederbiel / Leun, FR Limburg an der Lahn	HE	B 49	19.00 0	11	1	FS- Add.	895	2.600
11	OU Straubing, FR Landau an der Isar	BY	B 20	20.00 0	16	1	FS- Add.	1.296	1.200
12	Niederbiel / Leun, FR Limburg an der Lahn	HE	B 49	19.00 0	11	2	unkrit.	929	1.200
13	OU Straubing, FR Landau an der Isar	BY	B 20	20.00 0	16	4	unkrit.	1.146	1.400
14	OU Dachau, FR Dachau	BY	B 471	16.00 0	10	1	unkrit.	1.258	1.500
15	OU Dachau, FR Fürstenfeldbruck	BY	B 471	16.00 0	10	2	unkrit.	1.353	1.600

Tabelle 3.1: Untersuchungsabschnitte

4 Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs, des Überholverhaltens sowie der Pulkanalyse

Die im Hinblick auf die zu bearbeitende Problemstellung erforderlichen Kenngrößen

- des Verkehrsablaufs,
- von Überholvorgängen,
- der Pulkbildung und
- der Pulkauflösung

werden im Folgenden erläutert.

4.1 Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung

Der Verkehrsablauf, die Anzahl von Überholvorgängen sowie die Pulkbildung hängen maßgeblich von der Verkehrsstärke und der Verkehrszusammensetzung ab. Die Verkehrsstärke und die Verkehrszusammensetzung sind daher wichtige Parameter, die im Rahmen der empirischen Untersuchungen sowohl für die Überholabschnitte als auch für die Vorlaufstrecken erhoben werden müssen.

4.2 Geschwindigkeiten

Vor dem Hintergrund der zulässigen Geschwindigkeit von 100 km/h auf allen Untersuchungsabschnitten können die Anzahl und das Maß von Geschwindigkeitsüberschreitungen bestimmt werden, was u.U. Rückschlüsse auf die Verkehrssicherheit zulässt (vgl. Ziffer 2.4). Weitere mögliche Beurteilungskriterien für die Verkehrssicherheit sind die Standardabweichung bzw. Streuung der Geschwindigkeiten, die auf ein inhomogenes Geschwindigkeitsverhalten hinweisen können, sowie die Vorkommenshäufigkeit von so genannten „Exzessivgeschwindigkeiten“. Darunter werden im Rahmen dieser Arbeit in Analogie zu KÖLLE (1999) Geschwindigkeiten über 130 km/h verstanden.

Demzufolge sind insbesondere die Geschwindigkeiten der überholenden Fahrzeuge und die entsprechenden Geschwindigkeitsverteilungen am Ende eines Überholabschnitts von Interesse, da es hier zu kritischen Fahrmanövern aufgrund des nahenden kritischen Wechsels kommen könnte.

Neben diesen sicherheitsrelevanten Überlegungen haben die Geschwindigkeiten zudem einen Einfluss auf den Ablauf der Überholvorgänge. Der Zeitbedarf für einen Überholvorgang und damit die Länge des Überholwegs hängen u.a. von der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem überholenden und dem überholten Fahrzeug ab (vgl. vor allem ROOS, 1989). Somit sind nicht nur die Geschwindigkeiten (der Überholenden) auf dem Überholfahrstreifen, sondern auch die Geschwindigkeiten der Pulkführer (entsprechen den Überholten, die mit einer $V \leq 90$ km/h fahren, vgl. Ziffer 4.5) zu erfassen (vgl. Ziffer 5.4). Lassen sich Erkenntnisse über das Geschwindigkeitsverhalten auf den Vorlaufstrecken im Allgemeinen bzw. der Pulkführer im Besonderen gewinnen, gelingt es u.U., die Grundlage für ein Modell zur Abbildung des Überholverhaltens auf 2+1-Strecken zu erarbeiten.

4.3 Ein- und Ausschervorgänge

Die Auswertung aller Ein- und Ausschervorgänge über die gesamte Länge eines Untersuchungsabschnitts ist für das allgemeine Überholverhalten von Interesse. So sind eventuelle Häufungen von Ein- bzw. Ausschervorgängen in Abhängigkeit von der Länge der zweistreifigen Untersuchungsabschnitte sowie deren Position innerhalb der 2+1-Strecke zu untersuchen.

Beginnt der Überholabschnitt mit einem unkritischen Wechsel so beginnt jeder Überholvorgang mit einem Ausscheren und endet mit einem Einscheren. Aus der Anzahl aller Ein- bzw. Ausschierungen kann somit die Anzahl der Überholvorgänge bestimmt werden.

Beginnt der Überholabschnitt hingegen mit einer Fahrstreifenaddition, gilt es einige Besonderheiten zu beachten: Hier ist ein Einscheren nicht unbedingt gleichbedeutend mit dem Ende eines Überholvorgangs zu setzen. Da die einstreifige Vorlaufstrecke zum linken Fahrstreifen des Überholabschnitts wird, wechseln Fahrzeuge aufgrund des Rechtsfahrgebots auf den rechten Fahrstreifen, ohne dabei zwangsläufig ein Fahrzeug überholt zu haben. Andererseits müssen die Fahrzeuge des Durchgangstroms nicht ausscheren, um den Pulkführer zu überholen.

Um Zusammenhänge zwischen dem Beginn und dem Ende der Überholvorgänge und der Länge der Überholabschnitte zu ermitteln, dürfen bei Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, nur diejenigen Einschervorgänge betrachtet werden, bei denen das einscherende Fahrzeug auch ein anderes zuvor überholt hat. Dann entspricht die Anzahl der Einschervorgänge der Anzahl der Überholvorgänge.

Innerhalb der ersten und letzten 200 m vor dem Ende des Überholabschnitts werden Ein- und Ausschervorgänge zudem unter folgenden Gesichtspunkten untersucht:

- **Erste Ausscherstation:** Aufgrund von Beobachtungen des Ausscherverhaltens am Beginn der Überholabschnitte kann der Ort bestimmt werden, an dem die ersten Fahrzeuge ausscheren, um einen Überholvorgang einzuleiten. Bei Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, wird diese Position maßgeblich durch die Verkehrsstärke des Verkehrsstroms auf dem linken Fahrstreifen bestimmt. Je größer die Verkehrsstärke auf dem linken Fahrstreifen ist, desto schwieriger wird es für die einfahrenden Fahrzeuge vom rechten auf den linken Fahrstreifen zu wechseln.
- **Letzte Ausscherstation:** Aufgrund von Beobachtungen des Ausscherverhaltens am Ende der Überholabschnitte kann der Ort bestimmt werden, an dem die letzten Fahrzeuge vor dem Ende des Überholabschnitts ausscheren, um einen Überholvorgang einzuleiten.
- **Sperrflächenüberfahrten:** Sperrflächenüberfahrten stellen u.U. ein Verkehrssicherheitsrisiko dar und sollen daher besondere Beachtung finden.

Zusätzlich werden für ausgewählte Untersuchungsabschnitte auf den letzten 200 m vor dem Ende des Überholabschnitts die Ein- und Ausschervorgänge hinsichtlich ihres Konfliktpotenzials bewertet.

4.4 Überholweg und Überholrate

Weitere Auswertungskriterien für die Untersuchung des allgemeinen Überholverhaltens an 2+1-Strecken sind der Überholweg und die Überholrate.

Der Überholweg beschreibt die Strecke, die ein Verkehrsteilnehmer für einen Überholvorgang benötigt. Ein Überholweg setzt sich bei Überholabschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, aus dem Ausscheren, dem Einholen, dem Überholen und dem Einscheren zusammen (vgl. auch KLÖCKNER und KREBS, 1977 und Ziffer 6.7). Bei Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, gibt es eine weitere Definition: Hier kann sich der Überholweg auch aus dem Einscheren des Pulkführers und dem Einholen, dem Überholen sowie dem Einscheren des überholenden Fahrzeugs zusammensetzen.

Die Länge des Überholwegs ist zudem maßgeblich von der Anzahl der überholten Fahrzeuge abhängig. Die Bestimmung dieser Längen ist nur über eine Verfolgung jedes einzelnen überholenden Fahrzeugs möglich.

Die Überholrate beschreibt das Verhältnis zwischen der Anzahl von Überholungen in einem Zeit- und Längenintervall.

Da der Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung in der Bestimmung der optimalen Abschnittslängen liegt, steht die Pulkauflösung im Mittelpunkt der empirischen Untersuchungen. Unter diesem Gesichtspunkt ist eine Verfolgung jedes einzelnen Fahrzeugs nicht zielführend.

Daher wird von einer Quantifizierung des Überholwegs aller Fahrzeuge und der Ermittlung der Überholrate im Rahmen der vorliegenden Untersuchung abgesehen. Um den Zeitpunkt der

Pulkauflösung zu bestimmen, erfolgt die Beobachtung und Bestimmung des Überholwegs des letzten Fahrzeugs aus einer Fahrzeugschlange (vgl. Ziffer 4.6).

4.5 Pulkbildung

Untersuchungen zur Pulkbildung setzen zunächst die Definition eines Pulks voraus. Wie die Literaturanalyse gezeigt hatte, existiert jedoch bis heute keine abschließende und eindeutige Definition eines Pulks (vgl. Ziffer 2.5.3).

Im Rahmen dieser Untersuchung wird ein Pulk in Anlehnung an die von ROOS (1989) und später von BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) aufgegriffene Pulkdefinition wie folgt beschrieben: **Ein Fahrzeug ist einem Pulk zugehörig, wenn die Bruttozeitlücke zu dem vor ihm fahrenden Fahrzeug im Pulk oder zum Pulkführer weniger als 3 s beträgt und die Geschwindigkeit des Pulkführers dabei 90 km/h nicht überschreitet** (Pulkdefinition A, vgl. Ziffer 2.5.3).

Als ergänzende Bedingung muss im Vergleich zu ROOS und BRANNOLTE, BASELAU und DONG **das Fahrzeug den Pulkführer im Überholabschnitt auch überholen** (Pulkdefinition B). Andernfalls wird davon ausgegangen, dass Fahrzeuge, die den Pulkführer nicht überholen, bereits in der Vorlaufstrecke ihre Wunschgeschwindigkeit erreicht haben und somit auch nicht in ihrer Fortbewegung behindert sind. Diese Bedingung konnten die zuvor genannten Arbeiten aufgrund der dort gewählten Untersuchungsmethoden nicht einhalten.

4.5.1 Anzahl Pulks

Die Anzahl der Pulks beschreibt die Summe der in einem Zeitintervall und an einem lokalen Messquerschnitt erhobenen Fahrzeugschlangen, die durch einen Pulkführer in ihrer freien Geschwindigkeitswahl behindert sind.

Aus der Literatur (u.a. ROOS, 1989) ist bekannt, dass die Anzahl der Pulks vor allem durch die Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung auf der Vorlaufstrecke sowie der Charakteristik (insbesondere der Länge) der Vorlaufstrecke beeinflusst wird.

4.5.2 Fahrzeuge in Pulks

Die Kenngröße „Fahrzeuge in Pulks“ beschreibt die Summe aller der in einem Zeitintervall an einem lokalen Messquerschnitt erhobenen Fahrzeuge, die durch ein vorausfahrendes Fahrzeug in ihrer freien Geschwindigkeitswahl behindert waren.

Wie auch für die Anzahl der Pulks, lassen sich aus der Literatur Hinweise darauf finden, dass die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge durch die Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung auf der Vorlaufstrecke sowie der Charakteristik (insbesondere der Länge) der Vorlaufstrecke beeinflusst wird.

4.5.3 Pulkanteil

Der Pulkanteil wird in einigen Literaturquellen (z.B. ROOS, 1989) als mögliches Kriterium für die Qualität des Verkehrsablaufs auf 2+1-Strecken herangezogen. Er beschreibt das Verhältnis von beeinflussten, d.h. nicht mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahrenden Fahrzeugen (= Fahrzeuge in Pulks) zur Gesamtverkehrsstärke innerhalb eines Zeitintervalls. Es lassen sich aus dem Pulkanteil keine unmittelbaren Aussagen über die Pulklänge treffen, da die Zahl der beeinflussten Fahrzeuge auf ein Zeitintervall und nicht auf einen Pulk bezogen wird. Dieser Zusammenhang wird anhand eines Beispiels verdeutlicht:

In einem bestimmten Zeitintervall beträgt die Verkehrsstärke des Gesamtkollektivs 80 Kfz/Zeitintervall. Es treten 5 Pulks mit jeweils einer Länge von 5 Fahrzeugen auf. Die Summe der behinderten Fahrzeuge beträgt 25 Fahrzeuge. Der Pulkanteil ergibt sich zu:

$$\frac{\text{Anzahl behinderter Fahrzeuge}}{\text{Anzahl Fahrzeuge Gesamtkollektiv}} = \frac{25}{80} = 0,3125 = 31,25\%$$

Der gleiche Pulkanteil ergibt sich bei einer Anzahl von 25 Pulks mit der jeweiligen Pulklänge 1. Das Ergebnis sagt aus, dass ca. 1/3 aller Fahrzeuge in einem definierten Zeitintervall im einstreifigen Abschnitt in ihrer Fahrweise behindert werden.

Die Literatur schreibt im Bezug auf den Pulkanteil der Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung auf der Vorlaufstrecke sowie der Charakteristik (insbesondere der Länge) der Vorlaufstrecke den größten Einfluss zu.

4.5.4 Pulklänge

Die Pulklänge ist neben den Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Pulkführer und überholenden Fahrzeugen das wichtigste Kriterium zur Bestimmung der Pulkauflösung (vgl. ROOS, 1989). Je größer der einfahrende Pulk ist, desto länger ist folglich der Überholweg des letzten Fahrzeugs im Pulk. Vor dem Hintergrund, dass sich die einfahrenden Pulks innerhalb des Überholabschnitts auflösen sollen, würden größere Pulkängen eine großzügigere Bemessung des Überholabschnitts begründen. Dem steht gegenüber, dass die Längen der Überholabschnitte mit denen der einstreifigen Abschnitte korrelieren. Für die Bestimmung der optimalen Abschnittslängen einer 2+1-Strecke ist von großer Bedeutung, ob der oberhalb eines Abschnitts gebildete Überholdruck innerhalb der Überholabschnitte abgebaut werden kann. Rückschlüsse auf den Überholdruck können am Beginn des Überholabschnitts durch die Pulkängen an dieser Stelle gezogen werden.

4.6 Pulkauflösung

Die Auflösung der in die Überholabschnitte einfahrenden Pulks ist das Beurteilungskriterium für den Abbau des Überholdrucks. Die Pulks, die sich in der einstreifigen Vorlaufstrecke gebildet haben, sollen sich im darauf folgenden Überholabschnitt nach Möglichkeit vollständig auflösen (FGSV, 1996). Ein Pulk gilt als aufgelöst, wenn alle Fahrzeuge einer Fahrzeugschlange den Pulkführer überholt haben. Die Pulkauflösung wird maßgeblich durch die Pulklänge und die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem Pulkführer und den überholenden Fahrzeugen beeinflusst (vgl. ROOS, 1989).

Als mögliche Einflüsse sollen weiterhin

- die Position innerhalb der 2+1-Strecken,
- die Länge der Überholabschnitte,
- die Ausbildung des Beginns der Überholabschnitte sowie
- ein Lkw-Überholverbot

analysiert werden.

4.7 Pulkführer

Die Anzahl der Pulkführer entspricht der Anzahl der Pulks (vgl. Ziffer 4.5.1), die sich bis zum Ende der Vorlaufstrecke gebildet haben und in den Überholabschnitt einfahren.

Falls ein Überholabschnitt mit einer Fahrstreifenaddition beginnt, wird des Weiteren die Einscherstation des Pulkführers vom linken auf den rechten Fahrstreifen analysiert. Je später der Pulkführer einschert, desto später können die Fahrzeuge der Fahrzeugschlange den Pulkführer überholen. Erhöht sich die Verkehrsstärke des Einfahrstroms, ist zu erwarten, dass sich das konfliktfreie Einscheren für den Pulkführer des Durchgangstroms erschwert und sich seine Einscherstation in Fahrtrichtung weiter nach vorne verschiebt.

5 Durchführung der empirischen Untersuchungen

5.1 Einsatz von Videotechnik

Zur Erfassung der zuvor beschriebenen Kenngrößen werden der Verkehrsablauf, das Überholverhalten sowie die Pulkbildung und -auflösung mit Videokameras und Radarmessgeräten erfasst.

Die Videoanlagen bestehen entweder aus einem Camcorder oder einer Kombination aus Kamera und Aufnahmegerät (vgl. Bild 5.1). Die Videokameras werden in Reihe geschaltet, so dass später eine videotechnische Fahrzeugverfolgung möglich wird und der Beginn und das Ende der Überholvorgänge dokumentiert werden kann. Am Beginn und am Ende der Überholabschnitte sollen die Überholvorgänge mit einer Genauigkeit von 25 m auf einer Strecke von jeweils 200 m erfasst werden. In den dazwischen liegenden Bereichen wird eine praxisorientierte Genauigkeit von 100 m angestrebt. Ziel dieser Differenzierung ist eine genauere Betrachtung des unkritischen Wechsels bzw. der Fahrstreifenaddition am Beginn und des kritischen Wechsels am Ende der Untersuchungsabschnitte. Insbesondere im Hinblick auf Sperrflächenüberfahrten und das Einscherverhalten der Pulkführer sind diese Bereiche von Bedeutung. Die Reichweite der zur Verfügung stehenden Videokameras hängt neben den Kameraeigenschaften vor allem auch von der Linienführung der Untersuchungsabschnitte ab. Aus diesem Grund muss für jeden Untersuchungsabschnitt ein individueller Messaufbau entwickelt werden.

Ein möglicher Messaufbau für einen 1.800 m langen Untersuchungsabschnitt ist im Bild 5.2 dargestellt. Für einen Abschnitt dieser Länge werden beispielsweise sieben Kameras eingesetzt.

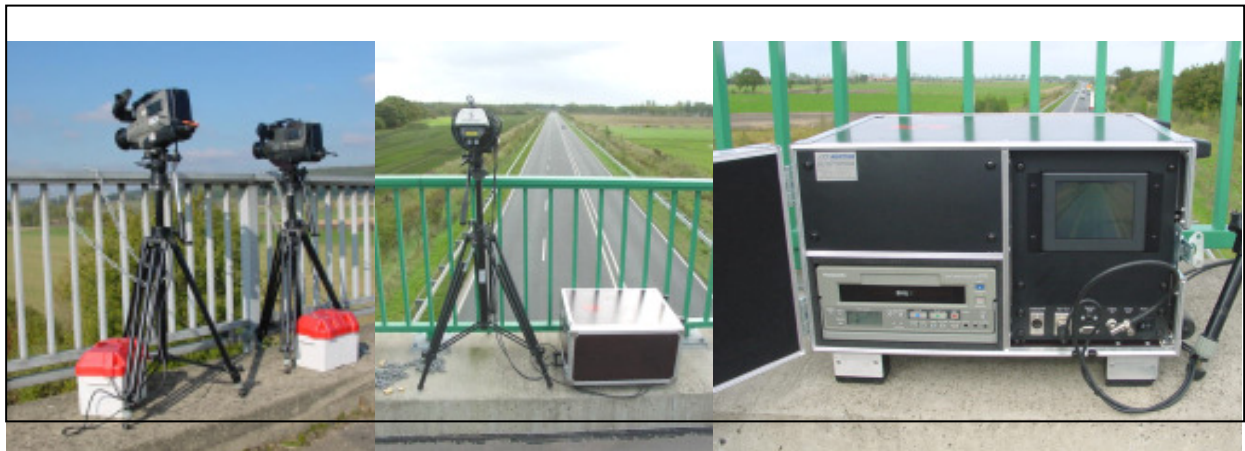


Bild 5.1: Camcordereinheit (links) und Kombination von Kamera und Aufnahmegerät (Mitte und rechts) (PRIEMER, 2004)

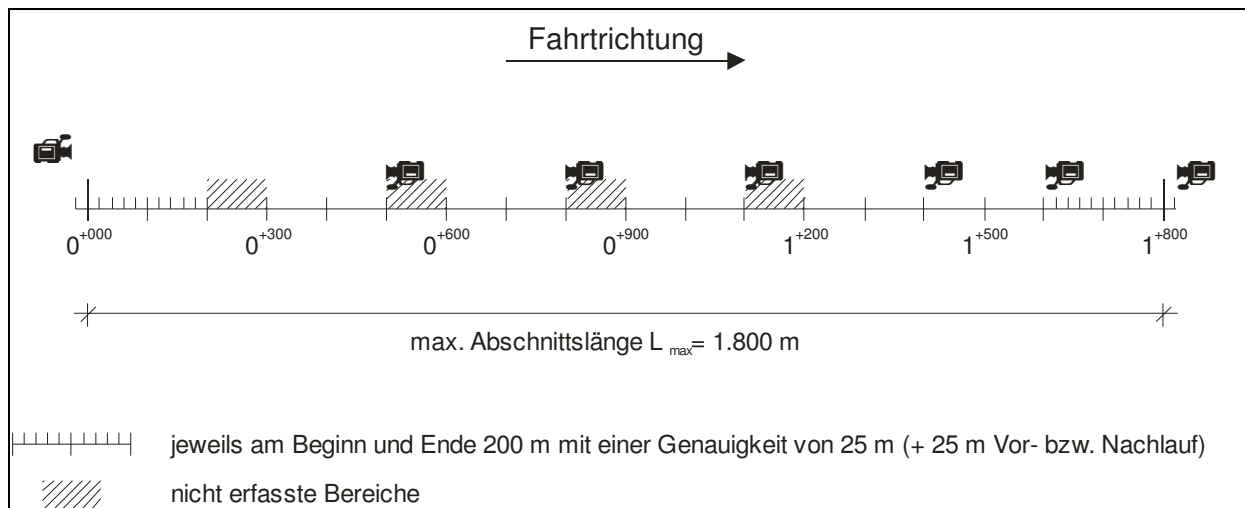


Bild 5.2: Messaufbau zur Erfassung des Überholverhaltens auf 2+1-Strecken (PRIEMER, 2004)

5.2 Stationierung und „nicht erfasste Bereiche“

Während der Durchführung der empirischen Untersuchungen werden die einzelnen Abschnitte vermessen und mit einer Stationierung versehen. Dabei wird ein Raster von 100 m-Bereichen über jeden Abschnitt gelegt. Bei einer Fahrstreifenaddition wird als Station 0 das Ende der Fahrstreifenbegrenzung (Zeichen 295 StVO) festgelegt. Bei einem unkritischen Wechsel befindet sich die Station 0 am Ende der Verziehung. Auf den ersten und letzten 200 m liegen die Stationen i.d.R. 25 m auseinander. Auf dem dazwischen liegenden Bereich beträgt der Abstand i.d.R. 100 m.

Trotz der Vielzahl von eingesetzten Kameras werden einzelne Bereiche der Untersuchungsabschnitte nicht videotechnisch erfasst. Diese Bereiche werden im Folgenden als „nicht erfassten Bereiche“ bezeichnet. Die vorrangig behandelte Fragestellung nach der Pulkauflösung kann dennoch einwandfrei geklärt werden. Befindet sich beispielsweise das letzte Fahrzeug der Fahrzeugschlange vor einem dieser nicht erfassten Bereiche noch auf dem linken Fahrstreifen, anschließend aber auf dem rechten, so muss das Fahrzeug innerhalb der nicht erfassten 100 m den Pulkführer überholt haben und eingeschert sein (vgl. Bild 5.3).

Die Videokameras werden nach Möglichkeit auf vorhandenen Brücken aufgestellt, da ihre Reichweite aus großer Höhe erheblich verbessert wird und daraus eine bessere Perspektive für die Auswertung resultiert. Sind an den zur Einhaltung der Messgenauigkeit erforderlichen Stellen keine Brücken vorhanden, kommen ca. 5 m hohe Masten zum Einsatz, die am Fahrbahnrand aufgestellt werden (vgl. Bild 5.4).

Der Messaufbau an den einzelnen Untersuchungsabschnitten wird unter Ziffer A 2 im Anhang beschrieben.

Anhand der Aufnahmen am Beginn der Überholabschnitte werden neben den Überhol- bzw. Ein- und Ausschervorgängen auch die Verkehrsstärke und der SV-Anteil sowie die auf den einstreifigen Vorlaufstrecken entstandenen Pulk und deren Längen ermittelt.

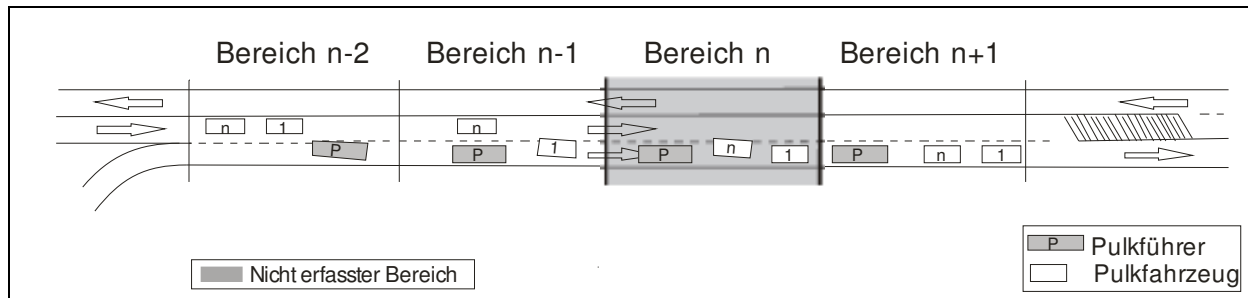


Bild 5.3: Bestimmung der Pulkauflösung in nicht erfassten Bereichen (PRIEMER, 2004)



Bild 5.4: Kameraeinheit auf Mast (PRIEMER, 2004)

5.3 Aufnahmezeiträume

Die Durchführung der empirischen Untersuchungen erfolgt je Untersuchungsabschnitt über einen Zeitraum von i.d.R. fünf Stunden während der Haupt- und Nebenverkehrszeiten. So kann gewährleistet werden, dass ein breites Spektrum an Verkehrsstärken erfasst wird.

5.4 Geschwindigkeitsmessungen

Wie unter Ziffer 2.3.1 aufgeführt, ist die relevante Geschwindigkeit, um das Geschwindigkeitsniveau eines Streckenabschnitts zu beschreiben, die Geschwindigkeit der frei bzw. unbehindert fahrenden Fahrzeugführer. Da bei der Streckenauswahl im Rahmen dieser Arbeit bewusst hoch belastete Strecken ausgewählt wurden (vgl. Ziffer 3), ist davon auszugehen, dass vor allem in den einstreifigen Vorlaufstrecken nur relativ wenige frei fahrende Verkehrsteilnehmer auftreten, wenn man die in den neueren Untersuchungen von BAKABA (2005) sowie EBERSBACH (2006) verwendete Definition eines frei fahrenden Fahrzeugs zugrunde legt (vgl. dazu auch BRANNOLTE, BASELAU und DONG, 2004).

Weiterhin gilt es die in Ziffer 4.2 formulierten Zielsetzungen der Geschwindigkeitsmessungen zu beachten. Demnach sollen zum einen Erkenntnisse zum Geschwindigkeitsverhalten im Hinblick auf die Verkehrssicherheit gewonnen werden. Zu diesem Zweck wurden die lokalen Geschwindigkeiten der freien, d.h. mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahrenden Fahrzeuge ca. 400 m vor dem Ende des jeweiligen Überholabschnitts (erster Hinweis auf das Ende der Überholmöglich-

keit mit Zeichen 532-20 StVO) gemessen. Mit Hilfe der aus diesen Messungen gewonnenen Erkenntnisse soll ggf. ein Maß für die Verkehrssicherheit in Abhängigkeit der Abschnittslänge und ggf. weiterer Parameter gefunden werden.

Zum anderen sollen anhand der Geschwindigkeitsmessungen aber auch die Geschwindigkeiten der Pulkführer und Überholenden im Hinblick auf den Überholvorgang ermittelt werden. Um Kenntnisse auch über die Geschwindigkeiten der Pulkführer zu erlangen und, um allgemeine Aussagen über das Geschwindigkeitsniveau auf den einstreifigen Vorlaufstrecken zu erhalten, wurden auch die Geschwindigkeiten der frei fahrenden Fahrzeuge unmittelbar vor dem Beginn der Überholabschnitte, aber noch außerhalb des Einflussbereichs von Knotenpunkten, erfasst. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die Geschwindigkeit der auf der Vorlaufstrecke frei Fahrenden, der Geschwindigkeit der Pulkführer im Überholabschnitt entspricht, soweit die Kriterien für einen Pulkführer eingehalten sind ($V_{\text{Pulkführer}} \leq 90 \text{ km/h}$, vgl. Ziffer 4.5). In Kombination mit den Geschwindigkeitsmessungen auf dem Überholfahrstreifen können somit evtl. auch Aussagen über die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Pulkführer und überholenden Fahrzeugen getroffen werden, die für die Pulkauflösung eine maßgebende Rolle spielen (vgl. vor allem ROOS, 1989).

BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) zeigten in ihrer Untersuchung, dass die Unterschiede im Hinblick auf die Geschwindigkeitsverteilung zwischen den frei fahrenden Pkw bzw. Lkw mit einer „Frontzeitlücke“ $> 8 \text{ s}$ und den „allein fahrenden“ Fahrzeugen mit der zusätzlichen Bedingung einer Bugzeitlücke $> 5 \text{ s}$ gering sind. Aus diesen und den oben aufgeführten Überlegungen heraus wird für diese Untersuchung ein Fahrzeug in Anlehnung an die Pulkdefinition von ROOS (1989) ab einer Bruttozeitlücke $t \geq 3 \text{ s}$ als frei fahrend angesehen.

An allen zweistreifigen Untersuchungsabschnitten und den entsprechenden einstreifigen Vorlaufstrecken werden nicht die Geschwindigkeiten aller frei fahrenden Fahrzeuge, sondern lediglich eine Stichprobe von 100 frei fahrenden Verkehrsteilnehmern gemessen. Ausnahmen bilden die Vorlaufstrecken zu den Untersuchungsabschnitten 1 und 6. Während beim Vorlauf zum Untersuchungsabschnitt 1 äußere Umstände eine Erhebung der Geschwindigkeiten verhinderten, stellt der Vorlauf zum Untersuchungsabschnitt 6 einen Sonderfall dar:

Vor dem Untersuchungsabschnitt 6 (vgl. Anhang Bild A 2.7) wird die B 62 zusammen mit der B 3 auf je zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung geführt. Der rechte Fahrstreifen bildet die Ausfahrt zur B 3 und wird an der Anschlussstelle Cölbe / Bürgeln subtrahiert. Die Vorlaufstrecke zum Untersuchungsabschnitt 6 ist somit nur auf ca. 500 m einstreifig. Davor stehen dem Durchgangsstrom zwei Fahrstreifen zur Verfügung. Darüber hinaus ist die zulässige Geschwindigkeit in diesem Bereich der B 62 auf 80 km/h reduziert (linker Fahrstreifen). Somit war hier eine Erhebung der Geschwindigkeiten nicht sinnvoll bzw. zielführend.

Die Erhebungen wurden mit Hilfe von Radarmessgeräten der Marke GATSOMETER durchgeführt (vgl. Bild 5.5), deren Messfehler im Bereich unter 100 km/h $\pm 3 \text{ km/h}$ beträgt sowie im Bereich über 100 km/h mit 3 % anzusetzen ist. Im Bild 5.6 ist der Messaufbau für die Geschwindigkeitsmessungen schematisch dargestellt. Die Zeiträume der Geschwindigkeitsmessungen sind nicht äquivalent mit denen der Erhebungen zum Überholverhalten, um eine Beeinflussung der Geschwindigkeitswahl durch die eingesetzte Videotechnik im Seitenraum und auf den Brückenbauwerken auszuschließen.



Bild 5.5: Geschwindigkeitsmessung (PRIEMER, 2004)

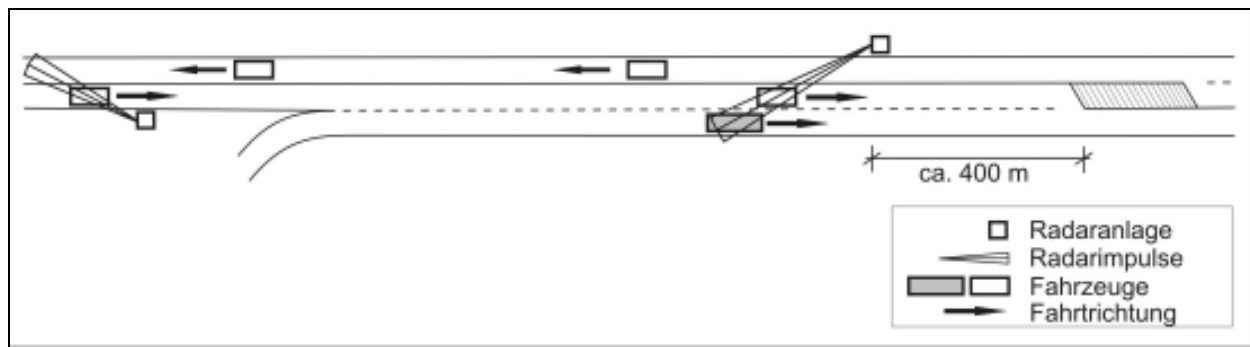


Bild 5.6: Messaufbau für die Geschwindigkeitsmessungen (PRIEMER, 2004)

6 Auswertungsmethodik

6.1 Allgemeines

Anhand der im Rahmen der empirischen Untersuchungen aufgezeichneten Videoaufnahmen und Radarmessungen werden folgende Kenngrößen des Verkehrsablaufs, des Überholverhaltens und der Pulkanalyse ausgewertet:

- Verkehrsstärke und -zusammensetzung der in den Überholabschnitt einfahrenden Fahrzeugströme
- Lokale Geschwindigkeiten der mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahrenden Fahrzeugen auf der Vorlaufstrecke und auf dem Überholfahrstreifen
- Ein- und Ausschervorgänge der überholenden Fahrzeuge und die daraus abgeleitete Anzahl an Überholvorgängen sowie Sperrflächenüberfahrten
- Bewertung der Verkehrssituationen auf den letzten 200 m vor dem Ende ausgewählter Untersuchungsabschnitte im Hinblick auf ihr Konfliktpotenzial
- Anzahl der Pulks am Ende der Vorlaufstrecke
- Anzahl der Fahrzeuge, die sich in Pulks befinden
- Pulkanteil
- Pulklänge
- Überholweg des letzten Fahrzeugs eines Pulks, welches den Pulkführer überholt (entspricht dem erforderlichen Weg zur Pulkauflösung)
- Anzahl nicht aufgelöster Pulks
- Anzahl und Fahrzeugklassen der Pulkführer und deren Einscherverhalten bei Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen

6.2 Auswertungsraster

Bei der Auswertung wird die in Ziffer 5.2 beschriebene Stationierung auf den Bildschirm übertragen. Auf diese Weise kann der Beginn und das Ende der einzelnen Überholvorgänge erfasst und ausgewertet werden.

Neben den von vornherein nicht erfassten Bereichen (vgl. Ziffer 5.2) konnten auch weitere Bereiche der Untersuchungsabschnitte teilweise nicht ausgewertet werden. Schlechte Licht- oder auch Witterungsverhältnisse verhinderten beispielsweise, dass die Stationierung erkannt und auf den Bildschirm übertragen werden konnte. Weiterhin verdeckten Regentropfen auf den Kameras teilweise Bereiche der Untersuchungsabschnitte, so dass auch hier eine Auswertung nicht erfolgen konnte. Eine weitere „Störungsquelle“ stellten die Brückenbauwerke dar, auf denen die Kameras aufgestellt wurden. Die Sichtschatten, die sich unter diesen Überquerungsbauwerken einstellen, verhinderten hier oftmals eine Auswertung.

Für die Analyse der Pulkauflösung stellen die nicht erfassten Bereiche kein Problem dar (vgl. Ziffer 5.2). Allerdings ist die Erhebung der absoluten Anzahl der Ein- und Ausschervorgänge in diesen nicht erfassten Bereichen nur unter erheblichen Aufwand zu leisten. Während bei der Pulkauflösung lediglich das letzte den Pulkführer überholende Fahrzeug zu verfolgen ist, müsste für die Erfassung der Ein- und Ausschervorgänge jedes Fahrzeug einzeln verfolgt werden. Da die primäre Zielsetzung der Untersuchung die Betrachtung der Pulkauflösung darstellt, wurde diese Einschränkung bereits bei der Entwicklung des Erhebungsdesigns in Kauf genommen. In der Konsequenz bedeutet diese Einschränkung, dass lediglich bei Untersuchungsabschnitten, bei denen keine „nicht erfassten Bereiche“ existieren, eine vollständige Erhebung der Überhol- bzw. Ein- und Ausschervorgänge vorgenommen werden kann. Für die im Rahmen dieser Arbeit zu behandelnde Fragestellung wird davon ausgegangen, dass Anhaltswerte und Tendenzen auch Untersuchungsabschnitte liefern, bei denen der Anteil an nicht erfassten Bereichen weniger als 25 % (bezogen auf die Gesamtlänge des Untersuchungsabschnitts) beträgt.

6.3 Wahl eines Bezugsintervalls

Insbesondere für die Analyse der Pulkbildung ist ein Aggregieren der relevanten Kenngrößen zweckmäßig. Die Größe des Betrachtungsintervalls ist dabei ein wichtiger Einflussfaktor bei der Auswertung der Daten. Es enthält Aussagen über die Schärfe und die statistische Sicherheit der erhobenen Kenngrößen. Die Forderung nach der Schärfe der Aussage impliziert ein möglichst kleines Betrachtungsintervall. Dem steht die Forderung nach statistischer Sicherheit entgegen.

Die erhobenen Daten einer empirischen Untersuchung sind als Stichprobe zu betrachten. Die erhobenen Daten sind demzufolge Schätzwerte, die um den Mittelwert der Grundgesamtheit streuen. Empirische Untersuchungen haben gezeigt, dass die Standardabweichung verkehrlicher Kenngrößen steigt, je kleiner das Betrachtungsintervall wird. Infolgedessen sinkt die Sicherheit, mit der eine Kenngröße der Stichprobe den wahren Wert der Grundgesamtheit abbildet. Somit nimmt das Risiko zu, dass nicht-signifikante Schwankungen überbewertet werden.

Auf der anderen Seite bewirken große Intervalle eine Verringerung der Schärfe, da signifikante Schwankungen aufgrund des größeren Zeitraums nicht erkannt werden.

Die ersten Auswertungen von PRIEMER (2004) mit unterschiedlich langen Zeitintervallen haben gezeigt, dass die Verwendung von 30-minütigen Intervallen in Bezug auf die Schärfe und Si-

cherheit der statistischen Kenngrößen für die in dieser Untersuchungen relevanten Betrachtungen am besten geeignet ist. Bei kleineren Intervallgrößen sind die Schwankungen des SV-Anteils zu groß, um Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Kenngrößen des Verkehrsablaufs und der Pulkbildung identifizieren zu können. Eine Verwendung von größeren Intervallen erschien nicht zielführend, da neben der Gefahr, dass signifikante Schwankungen nicht mehr erkannt werden, sich zudem der Stichprobenumfang im Rahmen von Korrelations- und Regressionsrechnungen weiter reduzieren würde.

Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen auch KIRSCH und WOLFF (2005). Ein auf der Basis des im Rahmen dieser Untersuchung erhobenen Datenmaterials durchgeführter Vergleich unterschiedlicher Intervallgrößen (5, 15 bzw. 30 Minuten) hat gezeigt, dass sich im Hinblick auf die im Rahmen ihrer Arbeit ermittelten Kenngrößen der Pulkbildung keine wesentlichen Unterschiede ergeben. Es wurde jedoch deutlich, dass bei der Verwendung des 5 Minutenintervalls durch eine vergleichsweise größere Streuung der Datenpunkte Ausreißer schwieriger zu erkennen waren, deren Identifikation aber zu einer besseren Erklärung der Zusammenhänge dient. Dies galt vor allem für die Analyse des Pulkanteils sowie der Pulklänge.

Aufgrund dieser Erkenntnisse und in Anlehnung an zurückliegende Untersuchungen (z.B. FROST, KELLER und KIRCHHOFF, 1989) wurden die anfangs gewählten 30 Minutenintervalle beibehalten.

6.4 Auswertezeiträume

Die jeweiligen Auswertungszeiträume je Untersuchungsabschnitt sind im Anhang unter Ziffer A 2 aufgeführt. Sie variieren zum Teil stark hinsichtlich des Umfangs und der Zeiträume innerhalb der Aufnahmezeiträume. Sie stellen somit nur einen Teilbereich der gesamten Aufnahmezeiträume dar. Dieser Umstand wird zum einen durch die Bildung von 30 Min-Intervallen verursacht (vgl. Ziffer 6.3), da sich ausgehend von dem am höchsten belasteten Intervall evtl. Verlustzeiträume am Beginn und am Ende des Messzeitraums ergeben. Zum anderen werden Verlustzeiten durch gestörte Messintervalle hervorgerufen. Unter Störungen sind in diesem Zusammenhang Einflüsse von außen auf den Verkehrsablauf zu verstehen, die aus der Untersuchungsmethodik bzw. aus dem Messdesign resultieren (vgl. Ziffer 5.2).

Weiterhin gibt es Störungen, deren Ursachen in Witterungseinflüssen und Materialeigenschaften der Messeinrichtungen liegen:

- Schlechte Bildqualität bei morgendlicher und abendlicher Dämmerung.
- Schlechte Bildqualität infolge von Aufblenden der Fahrzeugscheinwerfer bei starkem Regen und Reflexion des Scheinwerferlichts auf nasser Fahrbahn

Diese Art der Störungen trat vor allem bei der Auswertung des Untersuchungsabschnitts 3 auf. Der auszuwertende Zeitraum beträgt hier lediglich zwei Stunden. Starke Regenfälle und Windböen machten hier eine längere Auswertung unmöglich.

Für alle ausgewerteten Untersuchungszeiträume gilt, dass es sich dabei um ungestörte Messintervalle handelt, bei denen die angesprochenen Störquellen nicht vorlagen.

6.5 Verkehrsstärke und -zusammensetzung

Alle Verkehrsstärkeangaben beziehen sich nur auf eine Fahrtrichtung. Die Kraftfahrzeugverkehrsstärke wurde zunächst für die betrachtete Fahrtrichtung in 5 Minutenintervallen zusammengefasst und erst in einem zweiten Arbeitsschritt zu 30 Minutenintervallen aggregiert. Um den Einfluss des Schwerverkehrs auf den Verkehrsablauf und das Überholverhalten ermitteln

zu können, wurde dabei zwischen dem Leichtverkehr (Personenkraftwagen, Krafträder und Lieferwagen < 3,5 t)³ sowie Fahrzeugen des Schwerverkehrs unterschieden. Neben den standardmäßig dieser Fahrzeuggruppe zugehörigen Lastkraftwagen mit einem zulässigem Gesamtgewicht von mehr als 3,5 t, Last- und Sattelzügen sowie Bussen wurden dem Schwerverkehr auch Kfz < 3,5 t mit Anhänger sowie Wohnmobile zugeordnet.

Insbesondere im Hinblick auf die Pulkbildung und das Ein- und Ausscherverhalten zu Beginn der Untersuchungsabschnitte wurden die Verkehrsstärke und die Verkehrszusammensetzung zwischen dem Eingangs- und dem Durchgangsstrom differenziert. Dazu wurde als lokaler Messquerschnitt für die Erfassung der Beginn des Überholabschnitts (Station 0, vgl. 5.2) gewählt.

Bei Überholabschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, entspricht die erhobene Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung zu Beginn des Überholabschnitts den Kenngrößen der Vorlaufstrecke. Bei Abschnitten mit Fahrstreifenaddition wird dies vereinfachend angenommen, obwohl hier vor der Einfahrt in den Überholabschnitt einige Fahrzeuge am Knotenpunkt ausfahren. Dies wirkt sich jedoch nicht nur auf die Verkehrsstärke, sondern gleichzeitig auch auf die Kenngrößen der Pulkbildung aus; d.h. es reduziert sich sowohl die Verkehrsstärke als auch die Anzahl der Fahrzeuge in einem Pulk oder die Pulklänge, so dass dieses Vorgehen zulässig erscheint.

6.6 Lokale Geschwindigkeiten

6.6.1 Allgemeines

Wie unter den Ziffern 4.2 und 5.4 aufgeführt, werden im Rahmen der empirischen Untersuchungen zum Geschwindigkeitsverhalten neben den Geschwindigkeiten auf dem Überholfahrstreifen auch die Geschwindigkeiten auf den entsprechenden Vorlaufstrecken erhoben und anschließend analysiert.

Wie bereits bei der Auswahl der Untersuchungsstrecken (vgl. Ziffer 3) beschrieben, unterscheiden sich Vorlaufstrecken zu Untersuchungsabschnitten, die sich nicht an Pos. 1 befinden, und solche, die sich vor einem Überholabschnitt an Pos. 1, d.h. außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke befinden. Insbesondere der unterschiedliche Querschnitt und somit die Fahrbahnbreite sowie das absolute Überholverbot bei den Vorlaufstrecken, die sich nicht an Pos. 1 befinden, gilt es im Hinblick auf das Geschwindigkeitsverhalten zu beachten.

Fazit

Aufgrund der bestehenden Unterschiede zwischen Vorlaufstrecken außerhalb der 2+1-Strecken und denen innerhalb handelt es sich bei der zusammenfassenden Betrachtung aller Vorlaufstrecken um eine „geteilte Stichprobe“, die es getrennt zu analysieren gilt.

6.6.2 Deskriptive Statistik zur Darstellung der beobachteten Geschwindigkeitsverteilungen

Im Rahmen der deskriptiven Statistik werden die Häufigkeitsverteilungen der erhobenen Geschwindigkeiten anhand von Histogrammen mit dazugehörigen (kumulierten) Summenlinien im Anhang Ziffer A 3.1 dargestellt. Diese (übliche) Darstellungsform wurde gewählt, da somit Aus-

³ Vereinfachend wird im Folgenden von Pkw gesprochen.

sagen darüber zu treffen sind, welcher Anteil an Verkehrsteilnehmern sich mit einer höheren bzw. einer niedrigeren Geschwindigkeit im Verhältnis zu einer beliebigen Geschwindigkeit fortbewegt. Beispielsweise kann somit der Anteil der die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreitenden Fahrzeuge direkt abgelesen werden (vgl. Ziffer 4.2).

Weiterhin bilden die Verteilung der erhobenen Geschwindigkeiten und die aus dieser Darstellungsform zu ziehenden Informationen die Grundlage für einige der im Rahmen dieser Untersuchung durchzuführenden statistischen Tests (vgl. Ziffer 6.6.4).

Die Ermittlung der zulässigen Klassenbreite für die Darstellung in Histogrammen erfolgt nach DIN 55302, Blatt 1 (vgl. Anhang Ziffer A 3.1).

6.6.3 Aus Stichproben ermittelte statistische Kenngrößen

Aus Stichproben ermittelte Kenngrößen sind grundsätzlich mit Fehlern behaftet, da man davon ausgehen kann, dass diese sich von den wahren Kenngrößen der Grundgesamtheit unterscheiden. Sie streuen somit um den "wahren" Wert, den man jedoch i.d.R. nicht kennt. Es stellt sich somit die Frage, wie zuverlässig die Aussagen über die Grundgesamtheit (und deren Lagparameter) anhand der jeweiligen Stichprobe sind.

Unter Normalverteilungsannahme (vgl. Ziffer 6.6.1) stellt das **arithmetische Mittel** einen erwartungstreuen bzw. konsistenten Schätzer für den „wahren“ Parameter μ der Grundgesamtheit dar. Analog dazu gilt die empirische Standardabweichung s als konsistenter Schätzer für den „wahren“ Parameter σ der Grundgesamtheit.

Die **Standardabweichung** bildet die in der Grundgesamtheit tatsächlich vorhandene Streuung ab, die auch bei höchster Messgenauigkeit und unendlich vielen Einzelmessungen vorhanden ist. Sie zeigt somit, ob die Einzelwerte nahe beieinander liegen oder stark von einander abweichen. Im vorliegenden Fall ist die Standardabweichung demnach nichts anderes als ein Indiz dafür, wie homogen das Geschwindigkeitsniveau auf 2+1-Strecken ist. Ein kleiner Wert bedeutet hier, dass nahezu alle Wunschgeschwindigkeiten nahe beim Mittelwert liegen. Ein großer Wert der Standardabweichung hingegen zeigt, dass es auch eine Reihe von Fahrzeugen mit einer sowohl niedrigeren als auch höheren Wunschgeschwindigkeit gibt.

Bei der Auswertung der lokalen Geschwindigkeiten wird sowohl für die einstreifigen Vorlaufstrecken als auch für die Überholfahrstreifen in den zweistreifigen Abschnitten eine Vielzahl statistischer Kenngrößen aus den erhobenen Stichproben ermittelt:

- Minimale Geschwindigkeit V_{\min}
- Arithmetischer Mittelwert V_m
- 0,85-Quantil der Geschwindigkeiten V_{85}
- Maximale Geschwindigkeit V_{\max}
- Anteil an Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit $V_{\text{zul}} = 100 \text{ km/h}$
- Vorkommenshäufigkeit von Exzessivgeschwindigkeiten $V > 130 \text{ km/h}$ (vgl. Ziffer 4.2)
- Standardabweichung s
- Konfidenzintervall zum Signifikanzniveau $1-\alpha$ (KONF_α)

Grundsätzlich gilt es bei der Durchführung von Stichprobenmessungen zwei Fehler zu unterscheiden (HARTUNG, 2002):

1. der systematischer Fehler (Bias) b , der bei gleichen Messvorgängen immer die gleiche Struktur besitzt
2. der zufällige oder **Standardfehler** ε_i , der das Messergebnis in unvorhersehbarer und unterschiedlicher Weise beeinflusst

Somit ergibt sich für die aus i wiederholten Messungen ermittelten Mittelwerte:

$$\bar{x} = \mu + b + \varepsilon_i = \text{wahrer Wert} + \text{systematischer Fehler} + \text{zufälliger Fehler}$$

Während über die Größe des systematischen Fehlers b aus den Messwerten allein keine Information gewonnen werden kann und durch den Messaufbau weitestgehend ausgeschlossen werden sollte, lässt sich der Standardfehler oder auch Stichprobenfehler ε_i für jede Messreihe angeben. Der Standardfehler liefert somit eine Aussage über die Güte des aus der (zufälligen) Stichprobe ermittelten Mittelwerts. Er berechnet sich unter Normalverteilungsannahme aus dem Quotienten der Standardabweichung s^4 und der Wurzel des Stichprobenumfangs n ($=s/\sqrt{n}$).

Sei $\mu^* = \mu + b = \text{wahrer Wert} + \text{systematischer Fehler}$ und schließt man den systematischen Fehler aus (aus $b = 0$ folgt $\mu^* = \mu$), so besagt das Intervall $[\bar{x}_i - \varepsilon_i; \bar{x}_i + \varepsilon_i]$ etwa nicht, dass der „wahre“ Wert μ in diesem Intervall liegen muss. Vielmehr entspricht dieses Intervall unter Normalverteilungsannahme oder zumindest großer Stichprobe einem Konfidenzintervall zum Niveau $1-\alpha \approx 0,68$.⁵ D.h., dass der Parameter μ mit einer Wahrscheinlichkeit von 68 % in diesem Intervall liegt. In Analogie dazu gibt das Intervall $[\bar{x}_i - 2\varepsilon_i; \bar{x}_i + 2\varepsilon_i]$ den Bereich an, in dem μ mit etwa 95 %-iger Sicherheit liegt.⁶ Es entspricht somit dem 95 %-Konfidenzintervall für den „wahren“ Wert μ einer normalverteilten Zufallsvariablen.

Eine weit verbreitete Methode zur Beurteilung der Stichprobengüte ist daher die Angabe des so genannten **Konfidenzintervalls** für den Mittelwert. Das Konfidenzintervall zum Niveau $1-\alpha$ (auch: Vertrauensbereich bzw. Vertrauensintervall) liefert einen Bereich, der den unbekannten Parameter μ der Grundgesamtheit mit der „kleinen“ (Irrtums-) Wahrscheinlichkeit α nicht enthält. Im Umkehrschluss erhält man mit der Wahrscheinlichkeit von mindestens $1-\alpha$ den Bereich, in dem der unbekannte Parameter μ der Grundgesamtheit liegt. Für eine normalverteilte Grundgesamtheit lässt sich aufbauend auf dem Standardfehler das Konfidenzintervall wie folgt bestimmen:

$$[\bar{x} - u_{1-\alpha/2} \cdot \sigma/\sqrt{n}; \bar{x} + u_{1-\alpha/2} \cdot \sigma/\sqrt{n}] \quad \text{mit } \sigma \approx s \text{ (unter Normalverteilungsannahme)}^4$$

Kann keine Normalverteilung angenommen werden, kann für große Stichprobenumfänge die Verteilung der Zufallsvariablen durch die Standardnormalverteilung approximiert werden und die Methode ebenfalls zur Anwendung kommen. Die Wahrscheinlichkeit, dass man ein Intervall erhält, in dem der „wahre“ Parameter liegt, konvergiert dann mit wachsendem Stichprobenumfang gegen $1-\alpha$ (HARTUNG, 2002).

⁴ Da die empirische Standardabweichung s ein geeigneter Schätzer der unbekannten Standardabweichung σ unter Normalverteilungsannahme ist.

⁵ Der Faktor „1“ ergibt sich aus dem 0,32-Quantil der t-Verteilung bei großem Stichprobenumfang.

⁶ Der Faktor „2“ ergibt sich aus dem 0,05-Quantil der t-Verteilung bei großem Stichprobenumfang.

Eine weitere in der Literatur häufig anzufindende Vorgehensweise (z.B. HARTUNG, 2002 und KÖLLE, 1999), um die Stichprobengüte zu beurteilen, ist die Ermittlung der **relativen Abweichung** e_r vom Mittelwert gemäß

Gleichung 6.1: $e_r = \sqrt{(t_\alpha^2 \cdot s^2 / (\bar{x}^2 \cdot n))}$.

Voraussetzung ist auch hier wiederum eine normalverteilte Grundgesamtheit.⁴

Ausgehend von diesen Ausführungen werden zur Beurteilung der Stichprobengüte Konfidenzintervalle zum Niveau $1-\alpha$ verwendet. Als Signifikanzniveau wird $\alpha=0,05$ gewählt, da sich dieses Niveau im Hinblick auf den unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu begrenzenden Umfang bei verkehrstechnischen Untersuchungen als ausreichend genau erwiesen hat (vgl. z.B. KÖLLE, 1999).

Unter der Annahme, dass kein systematischer Fehler vorliegt, wird die Stichprobe als ausreichend genau angesehen, wenn der Wert für das 95 %-Konfidenzintervall ($KONF_{0,05}$) kleiner 3 km/h beträgt, da 3 km/h dem Messfehlerbereich des eingesetzten Radargeräts entspricht (vgl. Ziffer 5.4).

6.6.4 Statistische Tests

Um die im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden Fragestellungen beantworten zu können, sind eine Reihe von statistischen Tests erforderlich. Statistische Testverfahren dienen zur Überprüfung von statistischen Hypothesen über die Grundgesamtheit auf der Basis vorliegender Beobachtungswerte einer Stichprobe. Zur Überprüfung muss die Nullhypothese aufgestellt werden, die die vermutete Eigenschaft der Grundgesamtheit beinhaltet. In der realen Welt ist in jedem Fall entweder H_0 oder H_1 wahr. In der Praxis jedoch weiß man nie, ob H_0 oder H_1 richtig ist, weil man lediglich eine Stichprobe der Grundgesamtheit zur Entscheidungsfindung heranzieht. Somit ist der Testausgang, egal in welcher Richtung, mit einem Irrtumsrisiko behaftet, das es gegeneinander abzuwägen gilt. Dabei können zwei **Fehlerarten** begangen werden:

Fehler 1. Art (α -Fehler): Einen Fehler 1. Art begeht man, wenn man die Nullhypothese H_0 fälschlicherweise ablehnt (falsch positives Testergebnis). Der P-Wert gibt dabei an, auf welchem α -Niveau der verwendete Test H_0 gerade noch angenommen hätte. D.h., ist der P-Wert kleiner oder gleich dem festgesetzten α -Niveau, wird die Nullhypothese angenommen. Andernfalls ist sie abzulehnen.

Fehler 2. Art (β -Fehler): Einen Fehler 2. Art begeht man, wenn man die Nullhypothese H_0 fälschlicherweise annimmt (falsch negatives Ergebnis).

	Wahrer Sachverhalt: H_0 "Es gibt keinen Unterschied."	Wahrer Sachverhalt: H_1 "Es gibt einen Unterschied."
durch einen statistischen Test fällt eine Entscheidung für: H_0	richtige Entscheidung	Fehler 2. Art (β -Fehler) Wahrscheinlichkeit: β
durch einen statistischen Test fällt eine Entscheidung für: H_1	Fehler 1. Art (α -Fehler) Wahrscheinlichkeit: p (p-Wert)	richtige Entscheidung Wahrscheinlichkeit: $1-\beta$ (Teststärke)

Tabelle 6.1: Entscheidungstabelle (aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie: www.wikipedia.de, Stand: 10.07.2007)

Neben den beiden zu beachtenden Fehlerarten werden auch zwei prinzipiell verschiedene **Arten von Tests** unterschieden: Parametrische und nicht-parametrische Tests. In Abhängigkeit davon, ob die zu testende Verteilung der Zufallsvariablen (hier: Geschwindigkeiten) bekannt ist oder nicht, ist entweder ein parametrischer oder ein nicht-parametrischer Test anzuwenden. Im Gegensatz zu den nicht-parametrischen Tests, besitzen parametrische Tests eine größere statistische „Teststärke“. Die Teststärke hat den Wert $1-\beta$, wobei β die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, einen Fehler 2. Art zu begehen (vgl. Tabelle 6.1). Die Teststärke gibt also die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Signifikanztest (z.B. auf Gleichheit der Verteilungen oder auf Gleichheit der Mittelwerte) zugunsten der Alternativhypothese H_1 (z.B. „Es gibt einen Unterschied“) entscheidet, falls diese richtig ist. Demzufolge ist möglichst ein parametrischer Test einem nicht-parametrischen Test vorzuziehen.

In einem ersten Analyseschritt gilt es somit, die Verteilung der Geschwindigkeiten zu ermitteln, um die Voraussetzung für die Anwendung von parametrischen Tests zu schaffen. Wie bereits in Ziffer 6.6.1 erwähnt, ist aus einer Vielzahl von Untersuchungen zum Geschwindigkeitsverhalten auf Straßen bekannt, dass die gefahrenen Geschwindigkeiten eines Fahrzeugkollektivs i.d.R. einer Normalverteilung folgen. Demnach soll überprüft werden, ob die im Rahmen dieser Untersuchung erhobenen Geschwindigkeiten ebenfalls einer Normalverteilung folgen. Der Test auf Normalverteilung erfolgt mit Hilfe des **χ^2 -Tests**.

Die jeweiligen Messreihen werden dabei auf die aufgestellte Nullhypothese getestet. Bestätigt sich die Annahme nicht, ist H_0 zum gewählten α -Risiko zu verwerfen. Für den χ^2 -Test bedeutet H_0 , dass die empirische Verteilung einer Normalverteilung folgt. Wird H_0 angenommen, kann neben der empirischen auch die theoretische Geschwindigkeits(normal-)verteilung mit den zugehörigen Parametern (μ , σ) dargestellt werden. Diese kann dann u.U. bei der Modellbildung zum Überholverhalten Eingang finden. Weitere Erläuterungen zur Durchführung dieses Anpassungstests werden im Anhang Ziffer A 3.2 aufgeführt.

Anschließend wird überprüft, ob sich die Geschwindigkeitsverteilungen auf den verschiedenen Untersuchungsabschnitten signifikant voneinander unterscheiden oder aus einer Grundgesamtheit stammen. Für diese Fragestellung kann der relativ simple, da nicht-parametrische **KOLMOGOROFF-SMIRNOFF-Anpassungstest (KS-Test)** zur Anwendung kommen. Für den KS-Test lautet die Nullhypothese, dass sich die miteinander verglichenen Geschwindigkeitsverteilungen nicht signifikant unterscheiden. Die Bestätigung der Nullhypothese sagt also aus, dass die verglichenen Messreihen aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Die beiden verglichenen Stichproben können somit nicht mehr als unabhängig voneinander betrachtet werden. Dieser Aspekt ist u.U. für die Identifikation von Einflussfaktoren auf das Geschwindigkeitsverhalten auf 2+1-Strecken von entscheidender Bedeutung bzw. kann ggf. für die Modellbildung zum Überholverhalten hilfreich sein. Detaillierte Erläuterungen zur Durchführung dieses Tests werden im Anhang Ziffer A 3.3.1 aufgeführt.

Die Identifikation von Einflüssen auf das Geschwindigkeitsverhalten auf 2+1-Strecken erfolgt jedoch nicht ausschließlich anhand des KS-Tests, sondern darüber hinaus werden weitere einfache sowie multiple **Regressionsanalysen** durchgeführt. Im Gegensatz zur Korrelationsanalyse, bei der man lediglich ein quantitatives Maß für einen Zusammenhang erhält, wird bei der Regressionsanalyse ein funktionaler Zusammenhang spezifiziert (HARTUNG, 2002).

Bei der **einfachen** Regression betrachtet man nur den Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen X und Y . Die Ausprägungsvariablen x und y , die i.d.R. aus einer Stichprobe von X und Y entstammen, werden dabei Regressor und Regressand bzw. Schätzwert genannt. Es wird die

funktionale Beziehung $\hat{y}_i = f(x_i)$ spezifiziert bzw. anhand der Stichprobe geschätzt (HARTUNG, 2002). Bei einem linearen Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen handelt es sich um eine Regressionsgerade der Form $\hat{y}_i = k + bx$. Der Parameter k wird dabei als „Konstante“, der Parameter b als Regressionskoeffizient bezeichnet.

Der **P-Wert** gibt bei der Regressionsanalyse die Wahrscheinlichkeit bzw. das Alpha an, bei dem der Regressor gerade noch geeignet wäre, den Schätzwert zu bestimmen. Ist der P-Wert kleiner als das festgelegte Signifikanzniveau, bedeutet dies, dass der Regressor somit als signifikant zur Schätzung des jeweiligen Regressanden angesehen werden kann.

Bei einem **mehrfachen** (multiplen) Regressionsansatz muss bei einer Modellreduktion zur Identifikation der relevanten Regressoren die i.d.R. hohe Korrelation zwischen den einzelnen Regressoren (Multikollinearität) beachtet werden. Besteht eine solche **Multikollinearität** darf aus der Elimination einer Variablen nicht geschlossen werden, dass diese keinen Einfluss auf den Schätzwert besitzt. Vielmehr kann man im Allgemeinen nur sagen, dass die ausgeschlossene Variable bei gleichzeitiger Berücksichtigung der im Modell beibehaltenen Regressoren keinen wesentlichen zusätzlichen Beitrag zur Erklärung des Schätzwerts leistet (HARTUNG, 2002).

Im ersten Schritt wird eine multiple Regression mit allen Regressoren durchgeführt. Anschließend wird im Rahmen einer **Modellreduktion** überprüft, ob sich der jeweilige Schätzwert auch anhand einiger ausgewählter Regressoren erklären lässt. Die Entscheidung darüber erfolgt anhand des P-Werts. Ist der P-Wert kleiner als das festgelegte Signifikanzniveau, bedeutet dies, dass der ausgeschlossene Regressor signifikant notwendig ist, um den jeweiligen Schätzwert zu erklären. Er darf somit nicht reduziert werden, sondern muss im Modell verbleiben.

Als Maß für die Güte der Anpassung durch eine Regression dient das **Bestimmtheitsmaß**. Eine optimale Anpassung ist erreicht, wenn $R^2 = 1$ gilt. Die Differenzen $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$ zwischen den gemessenen Werten des Regressanden bzw. der abhängigen Variablen y_i und der mit Hilfe des Modells geschätzten Variablen \hat{y}_i bezeichnet man als Residuen. Die Varianz der Residuen nennt man Restvarianz. Das bedeutet, dass ein Teil der ursprünglichen Streuung nun in der Geraden enthalten ist, d.h. durch das Modell erklärt wird. Der durch das Modell erklärte Anteil der Varianz an der ursprünglichen Varianz ist das Bestimmtheitsmaß R^2 , das bei der linearen Regression gleich dem Quadrat des Korrelationskoeffizienten r (nach Pearson) ist (u.a. PETZOLDT, 2003). Allgemein gilt jedoch:

$$R^2 = \text{erklärte Varianz} / \text{ursprüngliche Varianz} = 1 - \text{Restvarianz} / \text{ursprüngliche Varianz}$$

mit:

$$\text{erklärte Varianz} = \text{ursprüngliche Varianz} - \text{Restvarianz}$$

$$\text{ursprüngliche Varianz} = \text{Varianz der Messwerte} = s^2 = \sum (y_i - \bar{y}_i)^2 / n$$

$$\text{Restvarianz} = \text{Varianz der Residuen} = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / n$$

\bar{y}_i = Stichprobenmittelwert

n = Stichprobenumfang

Somit ergibt sich für Berechnung des Bestimmtheitsmaßes:

$$\text{Gleichung 6.2: } R^2 = 1 - \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad \text{mit } 0 \leq R^2 \leq 1$$

6.6.5 Theil'scher Ungleichheitskoeffizient U

Mit Hilfe des Theil'schen Ungleichheitskoeffizienten U kann die Anpassungsgüte von zwei (sortierten) Datenreihen überprüft werden (vgl. u.a. FRIEDRICH, IRZIK und HOFFMANN, 2006). Im Ge-

gensatz zum Bestimmtheitsmaß erhält man durch die Anwendung des Theil'schen Ungleichheitskoeffizienten U nicht nur eine Aussage über die Anpassungsgüte, sondern auch noch Informationen darüber, um welche Fehlerart es sich handelt.

Der Theil'sche Ungleichheitskoeffizient U kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Ergibt sich $U = 0$, besteht eine perfekte Übereinstimmung der beobachteten (Y^{obs} ; z.B. Geschwindigkeiten [km/h] oder Pulkanteil [%]) und geschätzten Werten (Y^{sim}). $U = 1$ bedeutet dementsprechend, dass keine Übereinstimmung vorliegt.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Y_n^{sim} - Y_n^{obs})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Y_n^{sim})^2 + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Y_n^{obs})^2}}$$

N: Stichprobenumfang

Der Theil'sche Ungleichheitskoeffizient U setzt sich dabei aus drei Fehleranteilen zusammen.

- (1) Der Verzerrungsanteil U^M gibt den Teil des mittleren quadratischen Fehlers an, der aus einer Ungleichheit der Mittelwerte folgt, der durch systematische Über- oder Unterschätzung hervorgerufen wird. U^M sollte daher 0 sein.

$$U^M = \frac{(\bar{Y}^{sim} - \bar{Y}^{obs})^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Y_n^{sim} - Y_n^{obs})^2} \quad \bar{Y} : \text{Mittelwert}$$

- (2) Der Nicht-Effizienz Anteil U^S ist ein Maß für die unterschiedliche Varianz, also für den systematischen Unterschied in der Variation der gegenübergestellten Werte. U^S sollte deshalb ebenfalls 0 sein.

$$U^S = \frac{(s^{sim} - s^{obs})^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Y_n^{sim} - Y_n^{obs})^2} \quad s: \text{Standardabweichung}$$

- (3) Der Kovarianzanteil U^C beschreibt das Fehlen eines linearen Zusammenhangs zwischen den Daten. Er stellt eine Bewertungsgröße für unsystematische Fehler dar. U^C sollte 1 sein.

$$U^C = \frac{2(1 - \rho) s^{sim} s^{obs}}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Y_n^{sim} - Y_n^{obs})^2} \quad \rho: \text{Korrelationskoeffizient}$$

In Anlehnung an FRIEDRICH, IRZIK und HOFFMANN wird für den Fall, dass sowohl der Theil'sche Ungleichheitskoeffizient U , als auch die drei Fehleranteile U^M , U^S und U^C weniger als 20% von ihrem Zielwert abweichen, die Übereinstimmung der Datenreihen als ausreichend genau eingestuft. Das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen den beiden gegenüberzustellenden Datenreihen wird dabei indirekt über die Berechnung des Kovarianzanteils berücksichtigt.

6.7 Ein- und Ausschervorgänge

Ziel der Betrachtung der Ein- und Ausschervorgänge ist es, Aussagen über das allgemeine Überholverhalten zu erlangen. Es sollen die Verteilung der Ein- und Ausschervorgänge über die Länge der einzelnen Untersuchungsabschnitte ermittelt und eventuelle Häufungsstellen identifiziert werden. Nach Möglichkeit gilt es, dabei einen Einfluss der Abschnittslänge oder der Position innerhalb der gesamten 2+1-Strecke herauszuarbeiten.

Ein **Einschervorgang** gilt als abgeschlossen, wenn das einscherende Fahrzeug sich soweit auf dem rechten Fahrstreifen befindet, dass ein Fahrzeug auf dem linken Fahrstreifen den Einschierenden überholen kann (vgl. Bild 6.1).

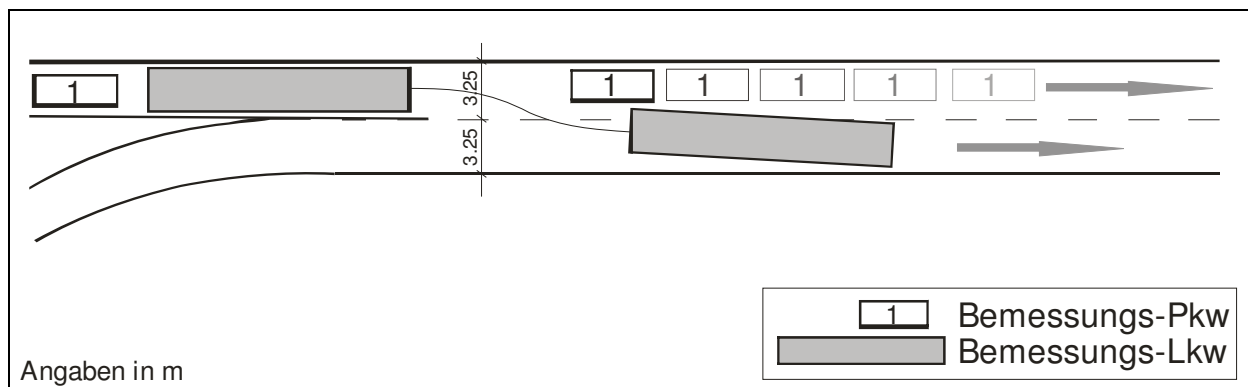


Bild 6.1: Definition des Einschervorgangs (PRIEMER, 2004)

Diese Definition hat sich gegenüber einer Festlegung anhand der Fahrstreifenmarkierung als zielführend herausgestellt. So konnte beispielsweise bei Untersuchungsstrecken, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, mehrfach beobachtet werden, dass das erste den Pulkführer überholende Fahrzeug diesen bereits überholt hatte, bevor der Pulkführer die Markierung vollständig überfahren hatte.

Ein **Ausschervorgang** wird lokalisiert, wenn das ausscherende Fahrzeug beginnt, die Markierung zu überfahren (vgl. Bild 6.2).

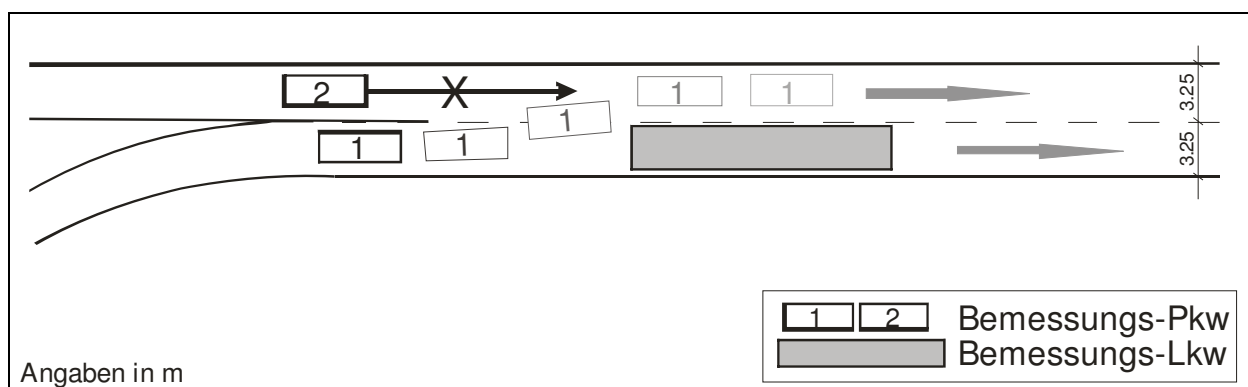


Bild 6.2: Definition des Ausschervorgangs (PRIEMER, 2004)

Des Weiteren wird die Anzahl der **Überholvorgänge** analysiert. Die Anzahl der Überholvorgänge kann im Rahmen der vorliegenden Untersuchung bei Untersuchungsabschnitten mit Fahrstreifenaddition näherungsweise durch die Anzahl der Einschervorgänge bestimmt werden (vgl. Ziffer 4.3). Bei den Untersuchungsabschnitten mit unkritischem Wechsel müsste theoretisch die Anzahl der Ein- und Ausschervorgänge gleich groß sein. Aufgrund der nicht erfassten Bereiche

kann es aber im Rahmen dieser Untersuchung zu Abweichungen kommen. Die beste Annäherung an die tatsächliche Anzahl der Überholvorgänge wird bei Untersuchungsabschnitten mit einem unkritischen Wechsel durch den jeweils größeren Wert für die Anzahl der Ein- bzw. Ausschervorgänge erzielt.

Sperrflächenüberfahrten zu Beginn (unkritischer Wechsel), aber vor allem am Ende (kritischer Wechsel) der Überholabschnitte finden eine besondere Beachtung im Rahmen dieser Untersuchung. Die Erhebung erfolgt analog zu der Auswertung der Ein- und Ausschervorgänge.

Abschließend werden die Ein- und Ausschervorgänge auf den letzten 200 m vor dem Ende ausgewählter Überholabschnitte (inkl. der Sperrflächenüberfahrten) im Hinblick auf die Verkehrssicherheit analysiert. Der Bereich von 200 m vor dem Ende des Überholfahrstreifens wurde zum einen aus dem Grund gewählt, da hier der zweite (und letzte) Hinweis auf das Ende des Überholfahrstreifens mit Zeichen 532-20 StVO erfolgt. Zum anderen sprachen auch Praktikabilitätsgründe bei der Erfassung mittels nur einer Kamera und der somit vereinfachten (gegenüber einer mit z.B. zwei in Reihe geschalteter Kameras) Auswertung für diese Festlegung. Die nachfolgend beschriebenen Verkehrssituationen werden den drei unterschiedenen Konfliktstufen zugeordnet:

Konfliktstufe I:

- Einschervorgang auf den letzten 200 m vor dem Ende ohne Gefährdung
- vollständiger Überholvorgang (Aus- und Einscheren) auf den letzten 200 m vor dem Ende ohne Gefährdung
- dabei wird jeweils auch ein leichtes Touchieren der Sperrfläche akzeptiert

Konfliktstufe II:

- Einschervorgang auf den letzten 200 m vor dem Ende (inkl. Touchieren der Sperrfläche) mit einem geringen Abstand zum Vorder- oder Hintermann
- Überfahren der Sperrfläche bis zu etwa der Hälfte ihrer Länge ohne Gefährdung

Konfliktstufe III:

- alle Vorgänge auf den letzten 200 m vor dem Ende, bei dem der Hintermann zu einer Bremsung gezwungen ist (identifiziert am Aufleuchten der Bremslichter)
- vollständiger Überholvorgang auf den letzten 200 m vor dem Ende mit einem geringen Abstand zum Vorder- oder Hintermann, bei dem beim Einschervorgang evtl. auch noch die Sperrfläche touchiert wird und der Hintermann evtl. bremsen muss
- Überfahren der Sperrfläche bis zu etwa der Hälfte ihrer Länge, wobei der Einschervorgang entweder durch einen geringen Abstand zum Vorder- oder Hintermann oder dadurch gekennzeichnet ist, dass der Hintermann bremsen muss
- Überfahren der Sperrfläche um mehr als die Hälfte ihrer Länge

Da eine solche Bewertung von Verkehrssituationen relativ subjektiv erfolgt, wurde diese Auswertung von ein und derselben Person durchgeführt, so dass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist. Die Bewertung wurde von LIESKE und WENKER (2005) im Rahmen ihrer Projektarbeit vorgenommen. Die Zuordnung der Verkehrssituationen zu den drei Konfliktstufen sowie die weitergehenden Analysen wurden jedoch für die Belange dieser Untersuchung modifiziert und unabhängig von der Arbeit von LIESKE und WENKER durchgeführt.

6.8 Pulkbildung

Wie unter Ziffer 4.5 erläutert, wurde im Rahmen dieser Untersuchung die Pulkdefinition nach ROOS modifiziert. Als zusätzliches Kriterium wurde eingeführt, dass ein Fahrzeug nur dann einem Pulk zugerechnet wird, wenn dieses Fahrzeug den Pulkführer im zweistreifigen Überholabschnitt auch überholt.

Um jedoch einen Vergleich mit der Arbeit von ROOS sowie der von BRANNOLTE, BASELAU und DONG durchführen zu können, wurde in einem separaten Arbeitsschritt die Analyse der Pulkbildung anhand der von den genannten Autoren verwendeten Pulkdefinition durchgeführt. Ausführlich wurde diese Problematik von KIRSCH und WOLFF (2005) im Rahmen einer Projektarbeit auf Basis des bei dieser Untersuchung erarbeiteten Datenmaterials behandelt. Die von KIRSCH und WOLFF erarbeiteten Ergebnisse berücksichtigen dabei, dass ROOS lediglich die Pulkbildung auf einstreifigen Abschnitten untersucht hat, die sich innerhalb einer 2+1-Strecke befinden. Die Analysen von KIRSCH und WOLFF beschränkten sich daher auf die Vorlaufstrecken dieser Untersuchung, die sich nicht vor einem Überholabschnitt an Pos. 1 befanden (vgl. Tabelle 3.1).

Wie bereits bei der Auswahl der Untersuchungsstrecken (vgl. Ziffer 3) und den Ausführungen zur Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen (vgl. Ziffer 6.6.1) beschrieben, unterscheiden sich Vorlaufstrecken zu Untersuchungsabschnitten, die sich nicht an Pos. 1 befinden, und solche, die sich vor einem Überholabschnitt an Pos. 1 befinden. Wichtigstes Unterscheidungsmerkmal im Hinblick auf die Pulkbildung ist sicherlich, dass bei den Vorlaufstrecken, die sich nicht an Pos. 1 befinden, ein absolutes Überholverbot besteht. Bei den Vorlaufstrecken außerhalb der 2+1-Strecken, bei denen es sich i.d.R. um einbahnig zweistreifige Strecken handelt, ist dies i.d.R. nicht der Fall.

Fazit

Aufgrund der bestehenden Unterschiede zwischen Vorlaufstrecken außerhalb der 2+1-Strecken und denen innerhalb handelt es sich bei der zusammenfassenden Betrachtung aller Vorlaufstrecken um eine „geteilte Stichprobe“, die es getrennt zu analysieren gilt.

6.8.1 Anzahl Pulks

Die Anzahl der Pulks wird am Ende der Vorlaufstrecke bzw. vor der Einfahrt in den Überholabschnitt ermittelt. Anschließend wird die Pulkanzahl in 30 Min-Intervallen zusammengefasst (vgl. Ziffer 6.5).

Bei Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, wurden lediglich die Pulks im Durchgangstrom erfasst. Auf eine Betrachtung der Pulks im Einfahrstrom wurde im Rahmen dieser Untersuchung verzichtet. Da die Einfahrrampe i.d.R. an einem plangleichen Knotenpunkt an eine untergeordnete Straße angeschlossen ist, wird hier die Pulkbildung maßgeblich durch den plangleichen Knotenpunkt beeinflusst.

6.8.2 Fahrzeuge in Pulks

Zusammengefasst werden die gepulkten Fahrzeuge in 30 Min-Intervallen (vgl. Ziffer 6.5).

Auch hierbei wurden bei den Untersuchungsabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, nur die gepulkten Fahrzeuge im Durchgangstrom erfasst (vgl. Ziffer 6.8.1).

6.8.3 Pulkanteil

Bezogen auf die zugehörigen Verkehrsstärken auf den Vorlaufstrecken ergeben sich aus der Anzahl der Fahrzeuge in Pulks die entsprechenden Pulkanteile pro 30 Min-Intervall.

6.8.4 Pulklänge

Die zu einem Pulkführer zugehörigen Fahrzeuge einer Fahrzeugschlange werden gezählt. Die auftretenden Pulklängen werden zu Beginn des Überholabschnitts ermittelt. Bei Untersuchungsabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, wurden nur die gepulkten Fahrzeuge im Durchgangsstrom erhoben (vgl. Ziffer 6.8.1).

Während der Phasen der Pulkauflösung kommt es zu unterschiedlichen Situationen, die eine nachträgliche Korrektur der Pulklängen erfordern. So wurde mehrfach beobachtet, dass nicht alle Pulkfahrzeuge im Überholabschnitt den Pulkführer überholen. Bei diesem Verhalten wird dem Fahrzeugführer unterstellt, dass er sich bereits in der einstreifigen Vorlaufstrecke mit seiner Wunschgeschwindigkeit bewegt hat. Er wurde demzufolge nicht von dem Pulkführer in seiner Geschwindigkeitwahl behindert und wird somit nicht als Pulkfahrzeug angesehen (vgl. Ziffer 4.5).

Zudem wurde beobachtet, dass sich die Reihenfolge der Fahrzeuge in der Fahrzeugschlange innerhalb der zweistreifigen Abschnitte ändern kann. So wechseln beispielsweise einzelne Fahrzeuge des Pulks zunächst hinter dem Pulkführer auf den rechten Fahrstreifen, um zu einem späteren Zeitpunkt wieder auszuscheren und den Pulkführer zu überholen. Dazu muss das erneute Ausscheren allerdings zeitnah erfolgen. Das bedeutet, dass ein solches Fahrzeug nur dann als Pulkfahrzeug angesehen wird, wenn es spätestens unmittelbar hinter dem ursprünglich letzten Fahrzeug wieder ausschert.

Die Zulässigkeit dieser Betrachtung zeigen Beobachtungen von Pulkaufösungen, bei denen sich der Überholweg des letzten Fahrzeugs innerhalb einer Pulkauflösung mit identischer und wechselnder Reihenfolge nur marginal ändert (PRIEMER, 2004).

Die dargestellten Varianten werden anhand von Bild 6.3 veranschaulicht:

- **Variante A:** Der einfahrende Pulk überholt geschlossen und ohne Änderung der Fahrzeugreihenfolge den Pulkführer. Die Pulklänge wird nicht korrigiert.
- **Variante B:** Die Reihenfolge der Fahrzeuge innerhalb der Pulkauflösung ändert sich. Fahrzeug 2 schert hinter dem letzten (n-ten) Fahrzeug erneut aus und ist neues letztes Fahrzeug. Aus den beschriebenen Gründen wird die Pulklänge nicht korrigiert.
- **Variante C:** Das n-te Fahrzeug schert hinter dem Pulkführer ein. Die Pulklänge wird um ein Fahrzeug vermindert.
- **Variante D:** Nicht das letzte Fahrzeug, dafür aber ein anderes der Fahrzeugschlange, schert hinter dem Pulkführer ein. Die Pulklänge wird um ein Fahrzeug vermindert. Beobachtungen haben gezeigt, dass der vermeintlich längere Überholweg für das n-te Fahrzeug nur unwesentlich länger ist, als bei einem einfahrenden Pulk mit der Länge von zwei Fahrzeugen und einem geschlossenen Überholvorgang (vgl. Variante A). Sollten allerdings zwei oder mehr aufeinander folgende Fahrzeuge aus der Fahrzeugschlange hinter dem Pulkführer einscheren und ihn nicht überholen, gilt der Pulk als unterbrochen. Das letzte dieser hinter dem ursprünglichen Pulkführer verbleibenden Fahrzeuge nimmt dann die Rolle eines neuen Pulkführers für die nachfolgenden Fahrzeuge ein.

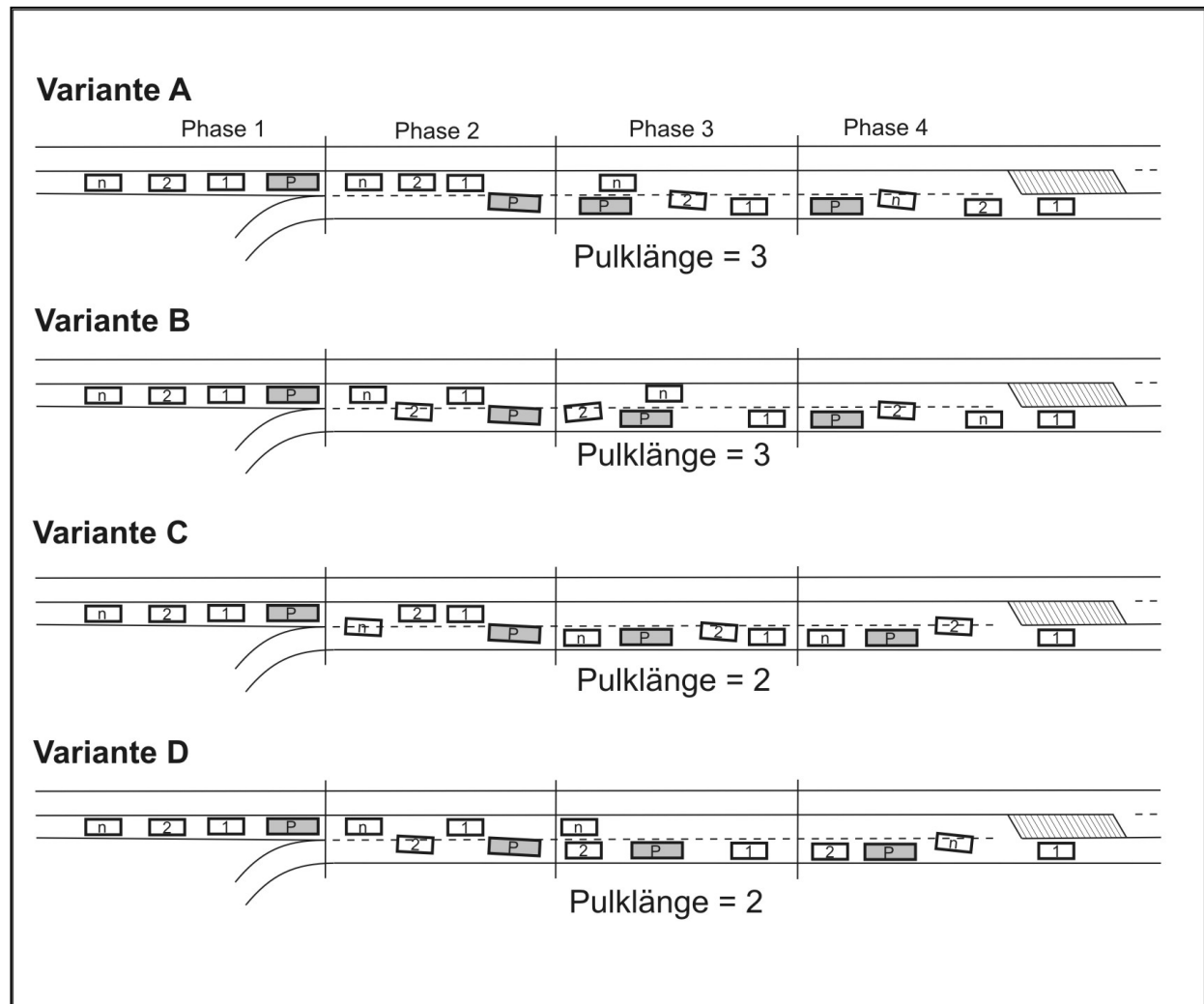


Bild 6.3: Varianten der Pulklängenbestimmung (PRIEMER, 2004)

6.9 Pulkauflösung

6.9.1 Aufgelöste Pulks

Allgemein gilt ein Pulk als aufgelöst, wenn alle Fahrzeuge der Fahrzeugschlange den Pulkführer überholt haben (vgl. Bild 6.4). Für den Beginn der Pulkauflösung muss aber zwischen Abschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel bzw. mit einer Fahrstreifenaddition beginnen unterschieden werden.

Bei den Abschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, wird die Ausscherstation des ersten Fahrzeugs der Fahrzeugschlange, das den Pulkführer überholt, als Beginn der Pulkauflösung definiert (vgl. Bild 6.2). Bei einem Beginn mit einer Fahrstreifenaddition definiert sich der Beginn der Pulkauflösung als die Einscherstation des Pulkführers (vgl. Bild 6.1).

Bild 6.4 zeigt beispielhaft die Phasen der Pulkauflösung für Untersuchungsabschnitte, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen. In der ersten Phase befinden sich der Pulkführer (P) und ein Pulk (bestehend aus n Fahrzeugen) am Ende des einstreifigen Abschnitts. Während der Phase 2 schert der Pulkführer auf den rechten Fahrstreifen ein. Somit kann das erste Pulkfahrzeug den Pulkführer überholen (Phase 3). Der Pulk gilt als aufgelöst, wenn auch das n-te Fahrzeug den Pulkführer überholt hat (Phase 4).

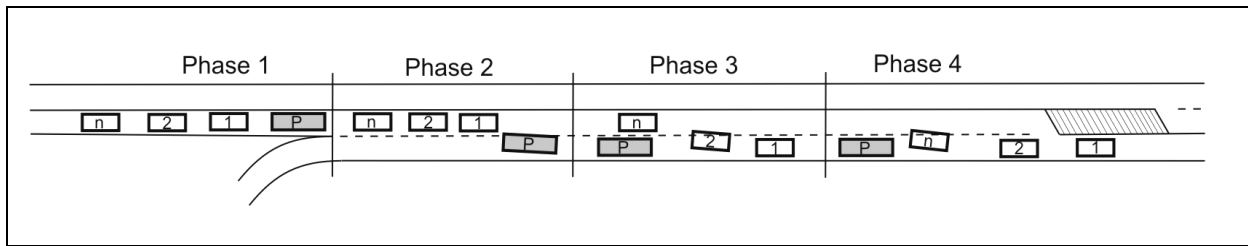


Bild 6.4: Vier Phasen der Pulkauflösung bei Überholabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen (PRIEMER, 2004)

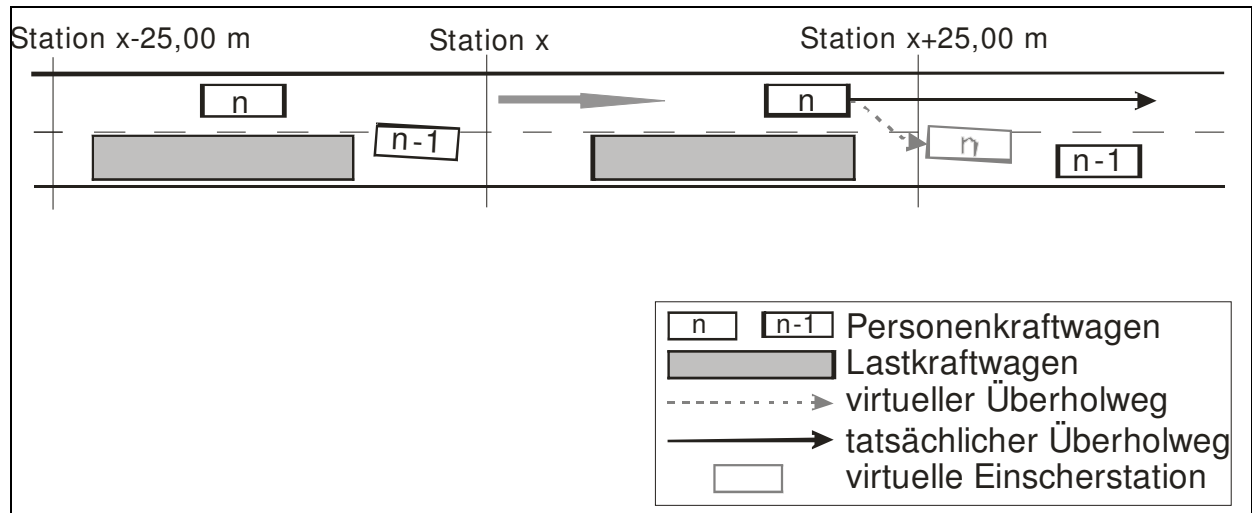


Bild 6.5: Virtuelle Einscherstation des letzten Fahrzeugs in einem Pulk (PRIEMER, 2004)

Überholt das letzte Fahrzeug nach dem Pulkführer noch weitere Fahrzeuge, die jedoch gemäß der Definition des Pulkführers dann mit einer Geschwindigkeit von über 90 km/h fahren müssen, so hat dies keinen Einfluss auf die Bestimmung des erforderlichen Wegs für die Pulkauflösung. In diesem Fall geht die *virtuelle* Einscherstation des letzten Fahrzeugs in die Auswertung ein. Es wird dabei abgeschätzt, in welchem Abschnitt des Rasters das letzte Fahrzeug einscheren könnte, nachdem es den Pulkführer überholt hat. Im Bild 6.5 wird diese Situation dargestellt: Das letzte (n-te) Fahrzeug des Pulks überholt den Pulkführer. Im Anschluss daran schert das n-te Fahrzeug nicht auf den rechten Fahrstreifen ein, sondern bleibt auf dem linken Fahrstreifen, um das n-1-te Fahrzeug (das mit einer Geschwindigkeit von über 90 km/h fährt) zu überholen. Für diesen Fall wird abgeschätzt, wann das n-te Fahrzeug theoretisch nach der Pulkauflösung einscheren könnte.

Die vorangegangenen Definitionen und Erläuterungen machen deutlich, dass es für die Pulkauflösung erforderlich ist, einen Pulk mit Hilfe der in Reihe geschalteten Kameras und dem beschriebenen Auswerteraster über den gesamten Zeitraum der Pulkauflösung zu verfolgen. Da dieses Vorgehen sehr aufwendig ist, werden bei der Analyse der Pulkauflösung nicht alle Pulks betrachtet, sondern nur eine zufällig ausgewählte Stichprobe. Die Stichprobe soll dabei so groß sein, dass statistisch gesicherte Aussagen getroffen werden können (vgl. Ziffer 12.1).

Pulks, die sich im Einfahrstrom gebildet haben, wurden im Rahmen der Pulkbildung und somit auch der Pulkauflösung aus den unter Ziffer 6.8.1 aufgeführten Gründen nicht betrachtet. Für diese Pulks können aber die Erkenntnisse, die sich aus den Betrachtungen zu den Abschnitten mit unkritischem Wechsel ergeben, näherungsweise übernommen werden.

6.9.2 Deskriptive Statistik zur Darstellung der beobachteten Überholwege bis zur Pulkauflösung

Aufgrund der verschiedenen Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Pulkführern und Überholenden wurde eine große Bandbreite an Überholwegen bis zur Pulkauflösung beobachtet. Um die bei der jeweiligen Pulklänge aufgetretenen Überholwege darzustellen, kommen so genannte **Box-Whisker-Diagramme** (vgl. z.B. KRÄMER, SCHOFFER und TSCHIERSCHE, 2005) zur Anwendung.

Das Box-Whisker-Diagramm (der Box-Plot) ist eine grafische Aufbereitung verschiedener Lageparameter im Rahmen der deskriptiven Statistik. Das für diese Untersuchung angepasste bzw. entwickelte Box-Whisker-Diagramm zeigt neben dem arithmetischen Mittelwert der Überholwege auch den Medianwert („mittleres“ bzw. 0,5-Quantil).

Der untere und obere Rand der „Box“ entsprechen im Rahmen dieser Arbeit dem 0,15- bzw. 0,85-Quantil. Durch die Länge der Box ist der Interquartilsabstand (interquartile range, IQR) definiert. Im vorliegenden Fall beschreibt die „Box“ also die Grenzen innerhalb derer die Überholwege liegen, die von 70 % der Pulks einer Länge bis zur Pulkauflösung benötigt wurden.

In der Literatur finden sich verschiedene Definitionen über die Länge der „Whisker“. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Definition von JOHN W. TUKEY (1977) verwendet. Danach werden Datenpunkte, die zwischen $1,5 \times \text{IQR}$ und $3 \times \text{IQR}$ liegen als „milde“ Ausreißer bezeichnet und Werte, die über $3 \times \text{IQR}$ liegen als „extreme“ Ausreißer. Die nach dieser Definition identifizierten extremen Ausreißer sollen aus der zu weiteren Analysen verwendeten Datenbasis ausgeschlossen werden.

6.9.3 Nicht aufgelöste Pulks

Die Anzahl der nicht aufgelösten Pulks soll ebenfalls erhoben werden. Ein Pulk gilt als nicht vollständig aufgelöst, wenn ein oder mehrere Fahrzeuge der Fahrzeugschlange auf den letzten 400 m den Überholvorgang abrechnen und somit den Pulkführer nicht überholen. 400 m wurden gewählt, da hier mit dem Zeichen 532-20 StVO der erste Hinweis auf das Ende der Zweistreifigkeit erfolgt. Fahrzeugführern, die vor dieser Ankündigung ihren Überholvorgang abbrachen, wurde unterstellt, dass sie dies aus „freien Stücken“ taten.

6.10 Pulkführer

Laut Definition darf die Geschwindigkeit des Pulkführers höchstens 90 km/h betragen (vgl. Ziffer 4.5). Die Geschwindigkeiten der einfahrenden Pulkführer wurden überschlägig mit Hilfe des Auswertungsrasters auf einem Abschnitt von 100 m bestimmt.⁷ In den Überholabschnitt einfahrende Fahrzeuge mit mehr als 90 km/h gehen demnach nicht als Pulkführer und die entsprechende Fahrzeugschlange nicht als Pulk in die Auswertung ein. Die Anzahl der Pulkführer entspricht somit der Anzahl der im Rahmen der Untersuchung betrachteten Pulks.

Die Pulkführer werden hinsichtlich ihres Fahrzeugtyps differenziert. Dabei wurden die auftretenden Pulkführer analog zu den in Ziffer 6.5 vorgestellten Fahrzeugklassen unterteilt.

Zudem wird an Untersuchungsabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, das Einscherverhalten des Pulkführers analysiert.

⁷ Dies bedeutet: Benötigte der vermeintliche Pulkführer weniger als vier Sekunden für die Distanz von 100 m, so fuhr er schneller als 90 km/h und wurde deshalb nicht als Pulkführer gewertet.

6.11 Analyse der empirischen Untersuchungen

Die Analyse der empirischen Untersuchungen erfolgt zum einem deskriptiv, zum anderen anhand von Korrelations- und Regressionsanalysen. Es werden dabei sowohl einfache lineare und nicht-lineare Zusammenhänge untersucht, als auch lineare Mehrfach-Regressionen. Es werden im Folgenden nur solche Beziehungen unter den analysierten Kenngrößen dargestellt, für die sich ein signifikanter Zusammenhang auf dem 0,05-Niveau (2-seitig) oder besser gezeigt hat. Die Angabe der Güte des Zusammenhangs erfolgt über das Bestimmtheitsmaß R^2 . Zusammenhänge, die durch ein Bestimmtheitsmaß von unter $R^2 = 0,5$ charakterisiert sind, werden im Rahmen dieser Arbeit im Hinblick auf die statistische Aussagekraft als nicht ausreichend gut bezeichnet und i.d.R. nicht dargestellt.

Dazu sei angemerkt, dass es eine allgemeine Festlegung, ab welchem Bestimmtheitsmaß von einem „guten“ oder sogar „sehr guten“ Zusammenhang die Rede sein kann, in der Literatur nicht existiert. Vielmehr kommt es für eine solche Festlegung auf die Problemstellung an. Z.B. kann bei stark zufallsbehafteten Prozessen (z. B. Wetter oder Börse) auch ein R^2 von 0,1 akzeptabel erscheinen. Für Testreihen unter Laborbedingungen hingegen könnte selbst ein Bestimmtheitsmaß von 0,9 als unbefriedigend angesehen werden. In Anlehnung an andere verkehrstechnische Untersuchungen (z.B. FRIEDRICH, IRZIK und HOFFMANN, 2006) wurde auch im Rahmen dieser Arbeit ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,5$ als akzeptabel eingestuft.

7 Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung

Die Untersuchungsabschnitte 1 bis 11 (vgl. Tabelle 3.1) beginnen mit einer Fahrstreifenaddition. Die Verkehrsstärken und die Verkehrszusammensetzung wurden daher für den Durchgangs- und den Einfahrstrom separat ermittelt. Dabei wurde für jeden Untersuchungsabschnitt u.a. die gleitende Spitzenstunde bestimmt. Die Spitzenbelastungen und die zugehörigen Verkehrszusammensetzungen sind in Tabelle 7.1 dargestellt. Es fällt auf, dass die in Tabelle 3.1 angegebenen SV-Anteile, die sich auf den DTV beziehen, teilweise deutlich von den SV-Anteilen in Tabelle 7.1, die sich auf die Spitzenstunde beziehen, unterscheiden.

Angemerkt werden muss, dass die morgendliche Messung am Untersuchungsabschnitt 3 aufgrund der Lichtverhältnisse erst um 08:05 Uhr beginnen konnte (vgl. Ziffer 6.4). Die tatsächliche morgendliche Spitzenstunde ist somit höchstwahrscheinlich nicht im Auswertungszeitraum enthalten.

Die höchste Gesamtbelastung in einem Untersuchungsabschnitt konnte mit ca. 1.300 Kfz/h am Untersuchungsabschnitt 7 (B 1 Paderborn / Schlangen) beobachtet werden. Die niedrigste Gesamtverkehrsstärke weist Untersuchungsabschnitt 14 (B 471 OU Dachau) mit 465 Kfz/h auf. Der SV-Anteil variiert i.d.R. zwischen 3,6 und 11,2 %. Ausnahmen bilden die Untersuchungsabschnitte 11 und 13 mit einem SV-Anteil von 14,4 bzw. 28,8 %. Beide Abschnitte sind Bestandteil der 2+1-Strecke auf der B 20 (Untersuchungsstrecke 5, OU Straubing).

Untersuchungsabschnitt	Zeitraum der beobachteten Spitzenbelastung (Gesamt)	Durchgangsstrom		Einfahrstrom		Gesamt	
		q	SV-Anteil	q	SV-Anteil	q _{max}	SV-Anteil
		[Kfz/h]	[%]	[Kfz/h]	[%]	[Kfz/h]	[%]
1	16:05 – 17:05	454	15,0	298	4,4	752	10,8
2	15:50 – 16:50	415	4,1	131	6,1	546	4,6
3	09:40 – 10:40	457	9,8	201	9,0	623	9,8
4	16:15 – 17:15	359	9,5	124	9,7	483	9,5
5	15:55 – 16:55	465	9,2	157	7,0	622	8,7
6	16:10 – 17:10	767	5,5	54	9,3	821	5,7
7	16:25 – 17:25	845	4,9	448	1,1	1.293	3,6
8	07:00 – 08:00	675	5,5	317	5,4	992	5,4
9	07:05 – 08:05	998	5,0	164	9,1	1.162	5,6
10	16:10 – 17:10	876	9,0	86	10,5	962	9,1
11	07:15 – 08:15	832	8,9	327	28,4	1.159	14,4
12	16:25 – 17:25	-	-	-	-	1.155	11,2
13	06:35 – 07:35	-	-	-	-	496	28,2
14	16:55 – 17:55	-	-	-	-	465	8,0
15	15:15 – 16:15	-	-	-	-	782	5,9

Tabelle 7.1: Maximale beobachtete Verkehrsstärken und zugehörige Verkehrszusammensetzung auf den Untersuchungsabschnitten

Auf Untersuchungsabschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen (Nr. 12 bis 15), entspricht die Verkehrsstärke auf dem Überholabschnitt, der auf der Vorlaufstrecke. Da bei Untersuchungsabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen (Nr. 1 bis 11), nur die Pulks aus dem Durchgangsstrom betrachtet werden (vgl. Ziffer 6.8.1), entspricht die Verkehrsstärke des Durchgangsstroms, der auf der Vorlaufstrecke (vgl. Ziffer 6.5). Die höchste Belastung wurde mit 1.155 Kfz/h auf der Vorlaufstrecke zu Untersuchungsabschnitt 12 (B 49 Niederbiehl / Leun), die niedrigste mit 415 Kfz/h auf der Vorlaufstrecke zu Untersuchungsabschnitt 2 (B 210 OU Jever) gemessen.

8 Lokale Geschwindigkeiten

8.1 Geschwindigkeitsverteilung und statistische Kenngrößen

Tabelle 8.1 bzw. Tabelle 8.2 zeigen eine Zusammenstellung der anhand der erhobenen Geschwindigkeitsstichproben ermittelten statistischen Kenngrößen für die Überholfahrstreifen in den Untersuchungsabschnitten bzw. für die entsprechenden Vorlaufstrecken. Neben dem Minimum und Maximum einer jeden Stichprobe (V_{\min} bzw. V_{\max}) sind dies insbesondere auch der arithmetische Mittelwert (V_m) sowie der dazugehörige Standardfehler, die Standardabweichung s und das auf dem Signifikanzniveau von 5 % berechnete Konfidenzintervall ($KONF_{0,05}$) (vgl. Ziffer 6.6). Weiterhin erfolgt die Angabe des 0,85-Quantils (V_{85}) sowie des Anteils der Geschwindigkeiten, die über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h lagen bzw. des Anteils an Exzessivgeschwindigkeiten V_{Exzessiv} (vgl. Ziffer 4.2). Als zusätzliche Information enthalten beide Tabellen auch noch den Anteil an Schwerverkehrsfahrzeugen, die in der Stichprobe von 100 Fahrzeugen enthalten sind.

Die Darstellung der Histogramme, die die Verteilung der verschiedenen Geschwindigkeiten zeigen, erfolgt im Anhang unter der Ziffer A 3.1.

Anhand der in den Tabellen angegebenen Kenngrößen kann zunächst eine Aussage zur Stichprobengüte getroffen werden. Der maximale Wert für das 95 %-Konfidenzintervall aller Messungen beträgt max. $KONF_{0,05} = 3,4 \text{ km/h}$. Insgesamt muss für drei Messreihen festgestellt werden, dass der Wert $KONF_{0,05} > 3 \text{ km/h}$ beträgt und somit die Stichprobe als ungenügend bezeichnet werden muss (vgl. Ziffer 6.6.3). Bei einer näheren Betrachtung dieser drei Messreihen fällt zunächst einmal auf, dass es sich dabei ausschließlich um Geschwindigkeiten auf Vorlaufstrecken handelt. In zwei Fällen liegt die jeweilige Vorlaufstrecke außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke, also vor einem Überholabschnitt an Pos. 1 (Vorlauf zum Abschnitt 8 bzw. 11).

Für die **Vorlaufstrecke Nr. 8** gilt es zwei Besonderheiten zu beachten:

- Die Vorlaufstrecke zum Untersuchungsabschnitt 8 (vgl. Anhang Bild A 2.12) ist mit 3.500 m die längste aller im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Vorläufe.
- Sie besitzt einen zweistreifigen Querschnitt mit einem beidseitig angeordneten Mehrzweckstreifen von etwa 1,8 m Breite (entspricht etwa dem noch in den RAS-Q 82 (FGSV, 1982) aufgeführten RQ 14 bzw. b2s, vgl. Bild 2.1). Beobachtungen während der Durchführung der empirischen Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Mehrzweckstreifen von vielen Fahrzeugen des Schwerverkehrs genutzt werden, um den mit höherer Geschwindigkeit nachfolgenden Fahrzeugen ein Überholen zu ermöglichen. Somit ist auch zu erklären, dass für diese Vorlaufstrecke sowohl die höchste mittlere Geschwindigkeit als auch die höchste V_{85} ermittelt wurde (vgl. Tabelle 8.2).

Für die **Vorlaufstrecken Nr. 11 und 13** hingegen sind keine Besonderheiten der Vorlaufstrecke selbst, sondern vielmehr der verhältnismäßig hohe SV-Anteil in der erhobenen Stichprobe für die ungenügende Stichprobengüte ausschlaggebend. Weitere Konsequenzen, die sich aus diesem Umstand ergeben, werden im Rahmen der noch durchzuführenden χ^2 -Tests auf Normalverteilung (vgl. Ziffer 8.2) sowie der KS-Tests (vgl. Ziffer 8.4) aufgezeigt.

Neben der Ermittlung der in der Tabelle 8.1 bzw. Tabelle 8.2 angegebenen statistischen Kenngrößen sollen im Rahmen der Analysen zum Geschwindigkeitsverhalten auch Erkenntnisse dahingehend erarbeitet werden, inwieweit die aus den empirisch ermittelten Stichproben gewonnenen Werte als konsistente Schätzer für die „wahren“ Parameter der Grundgesamtheit angesehen werden können. Unter Normalverteilungsannahme stellt z.B. das arithmetische Mittel der Stichprobe einen erwartungstreuen bzw. konsistenten Schätzer für den „wahren“ Mittelwert der Grundgesamtheit dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher überprüft, ob die erhobenen Geschwindigkeiten einer Normalverteilung folgen (vgl. Ziffer 8.2). Zahlreiche Untersuchungen zum Geschwindigkeitsverhalten auf Straßen (vgl. z.B. FRIEDRICH, IRZIK und HOFFMANN, 2006, PRIEMER, 2004) stützen diese (Null-)Hypothese.

Im Hinblick auf die Identifikation von Einflüssen auf das Geschwindigkeitsverhalten auf den Überholfahrstreifen und den Vorlaufstrecken von 2+1-Strecken sowie ein Modell für das Überholverhalten gilt es, Untersuchungsabschnitte zu identifizieren, die das gleiche Geschwindigkeitsverhalten aufweisen. Daher soll zunächst getestet werden, ob die empirisch erhobenen Geschwindigkeiten alle der gleichen Verteilung folgen. Wie bereits oben beschrieben, wird davon ausgegangen, dass auch auf den Überholfahrstreifen sowie den Vorlaufstrecken von 2+1-Strecken die auftretenden Geschwindigkeiten normalverteilt sind. In einem 2. Schritt soll dann getestet werden, ob sich diese der gleichen Verteilung folgenden Geschwindigkeiten in ihrer (Normal-)Verteilung unterscheiden (vgl. Ziffer 8.3).

Untersuchungsabschnitt (Pos.)	L	V _{min}	V _m	V ₈₅	V _{max}	Anteil V > V _{zul}	Anteil V >130 km/h (= V _{Exzessiv})	s	KONF _{0,05}	SV-Anteil (n = 100 Fz)
	[m]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[%]	[%]	[km/h]	[km/h]	[%]
1 (1)	1.474	83	103,0	110,0	138	59	1	8,4	1,7	14
2 (2)	1.208	67	102,9	112,0	130	60	0	8,2	1,6	14
3 (2)	1.498	60	96,4	110,0	135	31	1	13,0	2,5	14
4 (1)	1.092	79	111,6	125,0	169	76	5	13,8	2,7	2
5 (2)	1.687	85	111,2	118,3	145	95	2	9,0	1,8	2
6 (1)	1.706	90	114,0	126,3	166	88	11	14,4	2,8	2
7 (3)	828	76	102,6	113,0	147	54	5	13,5	2,7	2
8 (1)	1.403	74	105,7	119,2	136	67	5	12,7	2,5	1
9 (3)	1.195	86	110,6	123,0	157	82	7	12,4	2,4	0
10 (1)	895	85	105,4	115,0	137	67	1	9,4	1,8	0
11 (1)	1.296	57	94,0	103,5	154	21	1	12,1	2,4	3
12 (2)	929	85	104,9	114,0	142	64	2	10,2	2,0	0
13 (4)	1.146	56	91,1	105,0	119	27	0	12,6	2,5	4
14 (1)	1.258	81	115,0	127,3	169	91	12	13,9	2,7	3
15 (2)	1.353	82	104,3	114,0	149	58	2	11,5	2,3	0

Tabelle 8.1: Ergebnisübersicht zur statistischen Auswertung der lokalen Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen der Untersuchungsabschnitte

Vorlaufstrecke zum Untersuchungsabschnitt (ah = außerhalb 2+1-Strecke)	L _{Vorlauf}	V _{min}	V _m	V ₈₅	V _{max}	Anteil V > V _{zul}	Anteil V >130 km/h (= V _{Exzessiv})	s	KONF _{0,05}	SV-Anteil (n = 100 Fz)
	[m]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[%]	[%]	[km/h]	[km/h]	[%]
2	1.500	62	91,1	103,0	119	21	0	11,8	2,3	15
3	1.100	65	91,0	100,2	116	15	0	9,2	1,8	7
4 (ah)	2.000	64	94,2	106,0	120	32	0	11,8	2,3	11
5	1.400	62	94,4	106,2	139	25	2	13,6	2,7	16
7	1.800	68	93,0	104,2	114	26	0	11,5	2,3	13
8 (ah)	3.500	61	96,4	112,0	129	48	0	16,5	3,2	17
9	1.400	57	88,0	101,2	128,0	16	0	14,5	2,8	23
10 (ah)	2.600	57	84,5	94,0	103	2	0	9,1	1,8	23
11 (ah)	1.200	62	90,6	104,2	125	33	0	17,3	3,4	28
12	1.200	66	93,8	104,0	118	33	0	11,3	2,2	22
13	1.400	52	84,1	103,0	128	22	0	16,7	3,3	50
14 (ah)	1.500	60	89,3	104,0	125	20	0	13,5	2,7	14
15	1.600	61	90,2	101,0	132	16	1	12,7	2,5	13

Tabelle 8.2: Ergebnisübersicht zur statistischen Auswertung der lokalen Geschwindigkeiten auf den Vorlaufstrecken

8.2 Test auf Normalverteilung (χ^2 -Test)

Im Rahmen der Geschwindigkeitsanalyse wird mit Hilfe des χ^2 -Tests geprüft (vgl. Anhang Ziffer A 3.2), ob die auf den einzelnen Überholfahrstreifen und Vorlaufstrecken erhobenen Geschwindigkeiten einer Normalverteilung folgen. Die Gründe, diesen Test durchzuführen, sind in den Ziffern 4.2, 6.6.4 und 8.1 hinlänglich aufgeführt und werden daher an dieser Stelle nicht wiederholt. Im Bild 8.1 ist als ein **Beispiel** für den Untersuchungsabschnitt 1, in Bild 8.2 für den Untersuchungsabschnitt 2, die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Daten und die theoretische Normalverteilung dargestellt.

Für den Untersuchungsabschnitt 1 wurde die Prüfgröße χ^2 zu 29,31 und die Testgröße χ_{test}^2 in Abhängigkeit vom Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ und dem Freiheitsgrad m zu 12,59 ermittelt. Da die Bedingung $\chi^2 < \chi_{\text{test}}^2$ nicht erfüllt ist, muss die Nullhypothese verworfen werden. Dies bedeutet, dass die erhobenen Geschwindigkeiten im Untersuchungsabschnitt 1 nicht normalverteilt sind. Die Irrtumswahrscheinlichkeit für diese Aussage bzw. dafür, dass die Geschwindigkeiten tatsächlich doch normalverteilt sind, beträgt 5 % (vgl. Anhang Ziffer A 3.2).

Für den Untersuchungsabschnitt 2 wurde die Prüfgröße χ^2 zu 11,32 und die Testgröße χ_{test}^2 aufgrund des gleichen Signifikanzniveaus und des (zufällig) gleichen Freiheitsgrads ebenfalls zu 12,59 ermittelt. Da die Bedingung $\chi^2 < \chi_{\text{test}}^2$ somit erfüllt ist, kann die Nullhypothese angenommen werden. Dies bedeutet, dass die erhobenen Geschwindigkeiten im Untersuchungsabschnitt 2 normalverteilt sind. Analog zu diesen beiden Beispielen wurde für alle Untersuchungsabschnitte und Vorlaufstrecken der χ^2 -Tests durchgeführt.

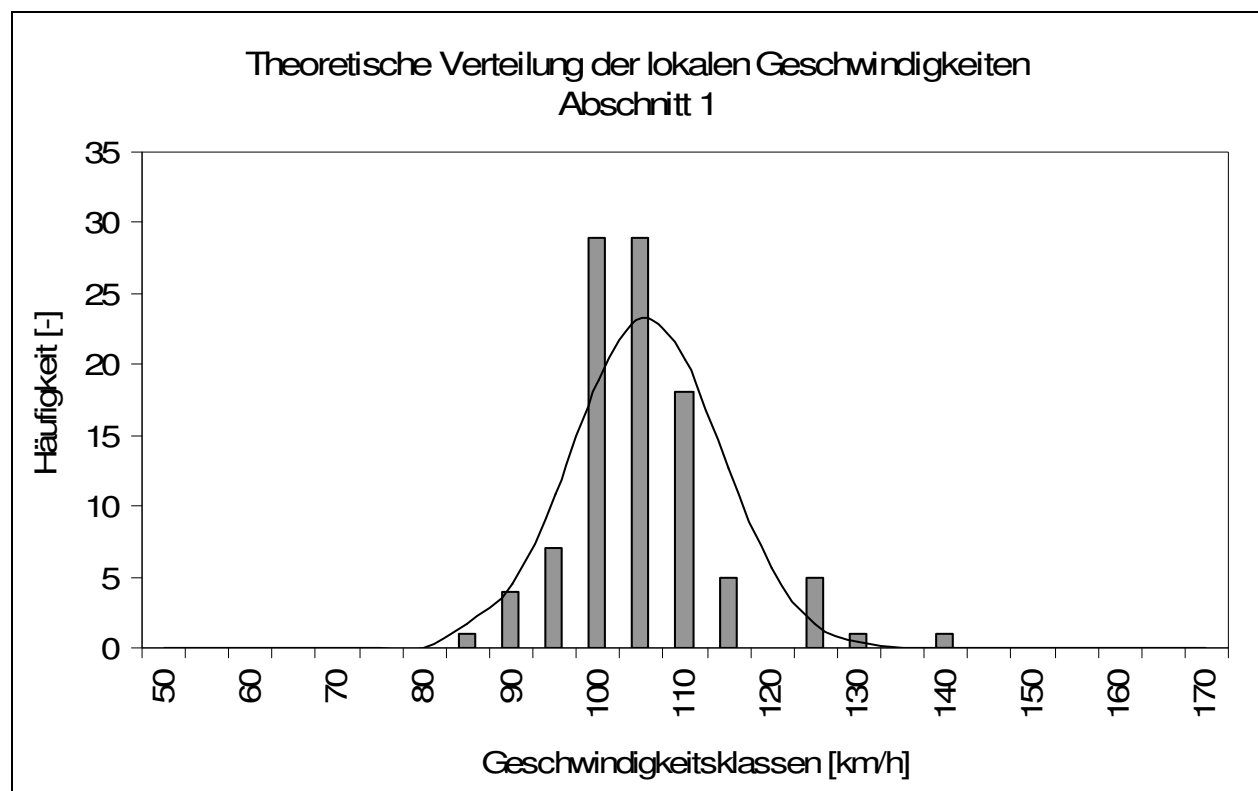


Bild 8.1: Häufigkeitsverteilung der lokalen Geschwindigkeiten für den Untersuchungsabschnitt 1 (n=100)

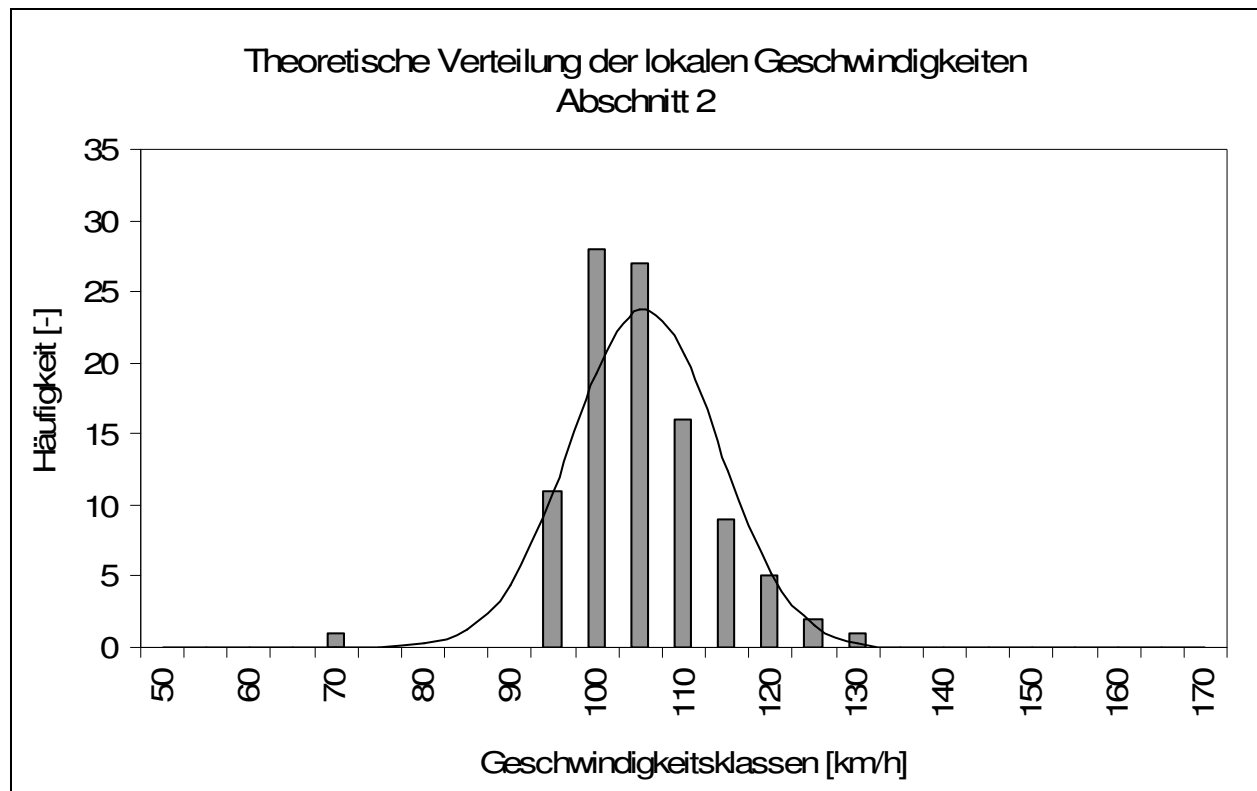


Bild 8.2: Häufigkeitsverteilung der lokalen Geschwindigkeiten für den Untersuchungsabschnitt 2 (n=100)

Für den χ^2 -Test kann als erstes Ergebnis zunächst festgehalten werden, dass die beobachteten Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen auf etwa zwei Drittel der betrachteten Abschnitte einer Normalverteilung folgen, deren Parameter (μ und σ) somit als bekannt angenommen werden können (vgl. Ziffer 6.6.3). Für die betrachteten Vorlaufstrecken gilt dies lediglich für etwa die Hälfte der Abschnitte.

8.2.1 Vorlaufstrecken

Für die Vorlaufstrecken gilt es im Hinblick auf den χ^2 -Tests auf Normalverteilung Folgendes festzustellen:

- Testet man für die Vorlaufstrecken Nr. 8, 9, 11 und 12 lediglich die Pkw-Geschwindigkeiten, kann die Normalverteilung angenommen werden. Somit zeigt sich hieraus, dass der in der Stichprobe enthaltende, hohe SV-Anteil das Ergebnis des χ^2 -Tests maßgeblich beeinflusst. Ab einem SV-Anteil in der Stichprobe von über 15 % sind die „langsamen“ Fahrzeuge der normalverteilten Geschwindigkeitsverteilung überrepräsentiert. Streng genommen liegt hier dann eine „geteilte“ Stichprobe vor. Der χ^2 -Test zeigt dies beim Vorlauf zum Abschnitt 10 jedoch nicht, da hier trotz des hohen SV-Anteils in der Stichprobe von 23 % die Nullhypothese zum 0,05-Niveau angenommen wird. Dies lässt sich anhand der Besonderheit der Vorlaufstrecke zum Abschnitt 10 und des daraus resultierenden vergleichsweise geringen Geschwindigkeitsniveaus erklären. Der **Vorlauf zum Untersuchungsabschnitt 10** (vgl. Anhang Bild A 2.14) ist mit 2.600 m Abstand zum nächsten davor gelegenen Knotenpunkt vergleichsweise lang. Die Mitteltrennung mittels Schutzplanken muss ebenfalls als Besonderheit im Hinblick auf das Geschwindigkeitsverhalten betrachtet werden, da somit zum einen keine Überholmöglichkeit besteht, zum anderen aber auch die Art der Mitteltrennung einen

psychologischen Effekt bei den Fahrzeugführern bewirkt. Dieser Einfluss zeigt sich im insgesamt niedrigen Geschwindigkeitsniveau auf dieser Vorlaufstrecke.

- Im Gegensatz zu den Vorlaufstrecken Nr. 8, 9, 11 und 12 führte auch die ausschließliche Betrachtung der Pkw-Geschwindigkeiten auf der Vorlaufstrecke Nr. 13 zu keiner Annahme der Normalverteilung. Mit einem SV-Anteil an der Stichprobe von exakt 50 % muss (!) hier eindeutig von einer „geteilten“ Stichprobe gesprochen werden.
- Konnten für die übrigen nicht normalverteilten Vorlaufstrecken noch Erklärungen für das Ergebnis des χ^2 -Tests gefunden werden, ist eine solche für die Vorlaufstrecke Nr. 5 nicht offensichtlich.

Als Konsequenz aus den Ergebnissen des χ^2 -Tests auf Normalverteilung ergibt sich für die Vorlaufstrecken Folgendes:

- Für die Geschwindigkeiten auf der **Vorlaufstrecke Nr. 5** ließ sich keine Normalverteilung nachweisen. Diese Vorlaufstrecke wird daher von den statistischen Tests und Analysen, bei denen eine Normalverteilung vorausgesetzt wird, ausgeschlossen.
- Das Ergebnis des χ^2 -Tests wird bei den **Vorlaufstrecken Nr. 8, 9, 11 und 12** maßgeblich durch einen vergleichsweise hohen SV-Anteil in der Stichprobe beeinflusst. Daher sind die Lkw-Geschwindigkeiten in dieser Stichprobe für die statistischen Tests, bei denen eine Normalverteilung vorausgesetzt wird, zu eliminieren. Für die Vorlaufstrecken Nr. 8 und 11 liegt dann ein derart geringes Konfidenzintervall vor, dass die Stichprobengüte als ausreichend bezeichnet werden kann (vgl. Ziffer 8.1).
- Da es sich bei der Messreihe zur **Vorlaufstrecke Nr. 13** um eine „geteilte“ Stichprobe handelt, wird das „Problem“ der ungenügenden Stichprobengüte (vgl. Ziffer 8.1) noch verschärft. Diese Messung ist daher als unbrauchbar einzustufen und wird von allen weiteren Betrachtungen zum Geschwindigkeitsverhalten ausgeschlossen.

8.2.2 Überholfahrstreifen

Hinsichtlich der Ablehnung der Normalverteilungsannahme bei den entsprechenden Messreihen auf den Überholfahrstreifen gilt es Folgendes festzuhalten:

- Der Überholabschnitt 6 ist durch einen vergleichsweise hohen Anteil an Exzessivgeschwindigkeiten von 11 % (vgl. Tabelle 8.1) gekennzeichnet. Entfernt man die Geschwindigkeiten über 130 km/h aus dieser Stichprobe, folgt auch diese Messreihe einer Normalverteilung.⁸
- Die Messreihe zum Überholfahrstreifen des Abschnitts 1 fällt durch einen relativ hohen SV-Anteil in der Stichprobe auf (vgl. Tabelle 8.1). Im Gegensatz zum Abschnitt 1 wurde die Normalverteilung für die Abschnitte 2 und 3, bei denen der gleiche SV-Anteil in der Stichprobe vorlag wie bei Abschnitt 1, zum 0,05-Niveau jedoch angenommen. So musste auch nach Elimination der Lkw aus der Stichprobe zum Abschnitt 1 die Nullhypothese zum Niveau $\alpha=0,05$ weiterhin verworfen werden. Der Umstand des hohen SV-Anteils in der Stichprobe kann demnach nicht ursächlich für den Ausgang des Anpassungstest gewesen sein. Somit spricht hier noch nichts dagegen, Lkw und Pkw bis zu einem gewissen SV-Anteil in einer gemeinsamen Stichprobe zu betrachten, da dann die Lkw, die „langsamen“ Fahrzeuge der normalverteilten Geschwindigkeitsverteilung repräsentieren.

⁸ Einen sogar um 1 % höheren Anteil an V_{Exzessiv} als Überholabschnitt 6 hat Abschnitt 14. Hier wirkt sich dieser hohe Anteil jedoch beim gewählten Signifikanzniveau nicht auf das Ergebnis des χ^2 -Tests aus.

- Somit ist sowohl für die Messreihe zum Abschnitt 1, aber auch für die beiden erhobenen Geschwindigkeitsverteilungen auf den Überholfahrstreifen der Abschnitte 5 und 11 keine Erklärung für das Ergebnis des χ^2 -Tests offensichtlich.

Als Konsequenz aus den Ergebnissen des χ^2 -Tests auf Normalverteilung ergibt sich für die Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen Folgendes:

- Das Ergebnis des χ^2 -Tests wird beim **Untersuchungsabschnitt 6** maßgeblich durch einen vergleichsweise hohen Anteil an Exzessivgeschwindigkeiten beeinflusst. Daher sind die Exzessivgeschwindigkeiten in dieser Stichprobe für die statistischen Tests und Analysen, bei denen eine Normalverteilung vorausgesetzt wird, zu eliminieren.
- Für die Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen der **Untersuchungsabschnitte 1, 5 und 11** konnte anhand der erhobenen Stichproben keine Normalverteilung festgestellt werden. Diese Geschwindigkeitsmessungen werden daher von den statistischen Tests und Analysen, bei denen eine Normalverteilung vorausgesetzt wird, ausgeschlossen.

Insgesamt gilt es für die Messreihen, bei denen keine Normalverteilung angenommen werden kann, dies bei der Interpretation der in Tabelle 8.1 bzw. Tabelle 8.2 aufgeführten statistischen Kenngrößen zu beachten. So kann das arithmetische Mittel der betroffenen Stichproben nicht als Schätzer für den Parameter μ der Grundgesamtheit herangezogen werden. Gleiches gilt für die empirische Standardabweichung s im Bezug auf den Parameter σ (vgl. Ziffer 6.6.3).

8.3 Test auf gleiche Grundgesamtheit (KS-Test)

Im nächsten Analyseschritt wurde mit Hilfe des KS-Tests überprüft, ob die auf den einzelnen Untersuchungsabschnitten erhobenen Geschwindigkeiten aus einer Grundgesamtheit stammen (vgl. Ziffer 6.6.4). Da für das Gro der erhobenen Geschwindigkeitsstichproben nachgewiesen werden konnte, dass sie normalverteilt sind und für eine Vielzahl der Messungen, für die dies nicht galt, eine plausible Erklärung für diesen Umstand gefunden werden konnte (vgl. Ziffer 8.2), kann zunächst einmal für das Geschwindigkeitsverhalten auf 2+1-Strecken festgehalten werden, dass die auftretenden Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen und den Vorlaufstrecken von 2+1-Strecken i.d.R. einer Normalverteilung folgen. Unter Berücksichtigung der auch unter Ziffer 8.1 beschriebenen Zielsetzung, die mit dem KS-Test im Rahmen dieser Arbeit verfolgt wird, wurden ausschließlich die normalverteilten Geschwindigkeiten dahingehend getestet, ob sie sich in ihrer (Normal-)Verteilung unterscheiden. Im Anhang Ziffer A 3.3.2 sind die Ergebnisse dieser Tests dargestellt.

Zunächst wurden alle ermittelten, normalverteilten mit den aus dem arithmetischen Mittelwert und der empirischen Standardabweichung geschätzten Parametern (μ , σ) Geschwindigkeitsverteilungen einander gegenübergestellt. Erwartungsgemäß musste bei der Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten auf dem Überholfahrstreifen mit den Geschwindigkeiten auf den zugehörigen Vorlaufstrecken die Nullhypothese i.d.R. verworfen werden (Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$). Ausnahme bilden die Geschwindigkeiten auf dem Überholfahrstreifen des Untersuchungsabschnitts Nr. 8 und der entsprechenden Vorlaufstrecke. Hier führen die (baulichen) Besonderheiten der **Vorlaufstrecke Nr. 8** zu einem relativ hohen Geschwindigkeitsniveau (vgl. Ziffer 8.1) und dazu, dass die Nullhypothese mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % verworfen werden muss. D.h., dass die Geschwindigkeitsverteilungen sich nicht signifikant unterscheiden und sie demnach aus einer Grundgesamtheit stammen.

Vergleicht man die Verteilungen der Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen bzw. den Vorlaufstrecken untereinander, so konnte zwar bei einigen Untersuchungsabschnitten bzw. Vor-

laufstrecken festgestellt werden, dass sich ihre Geschwindigkeitsverteilung nicht signifikant unterscheiden und sie demnach aus einer Grundgesamtheit stammen (Annahme der Nullhypothese). Bei mehreren Gegenüberstellungen zeigte sich jedoch, dass die Nullhypothese mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % zu verwerfen ist. Die Ursachen für die Unterschiede im Geschwindigkeitsverhalten gilt es im Folgenden zu identifizieren.

8.4 Geschwindigkeitsverhalten auf den Vorlaufstrecken außerhalb einer 2+1-Strecke

Für die Vorlaufstrecken, die außerhalb einer 2+1-Strecke liegen (Nr. 4, 8, 10, 11, 14) ist unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem χ^2 -Test zu den Vorlaufstrecken Nr. 8, 10 und 11 (vgl. Ziffer 8.2) festzustellen, dass die Geschwindigkeiten auf den beiden übrigen Vorlaufstrecken Nr. 4 und 14 derselben Grundgesamtheit entstammen (KS-Test, vgl. Anhang Ziffer A 3.3). Im Gegensatz dazu unterscheidet sich das Geschwindigkeitsniveau auf den Vorlaufstrecken Nr. 8, 10 und 11 zum einen durch die Besonderheiten der Vorlaufstrecken Nr. 8 und 10 (vgl. Ziffer 8.1 und 8.2) von dem auf den Vorlaufstrecken Nr. 4 und 14. Zum anderen kommt bei den Vorlaufstrecken Nr. 8 und 10, aber auch 11 der Umstand hinzu, dass aufgrund des Ergebnisses des χ^2 -Tests (vgl. Ziffer 8.2) die Lkw-Geschwindigkeiten aus den jeweiligen Stichproben entfernt und somit nur Pkw-Geschwindigkeiten für den KS-Test herangezogen wurden. Dieses Vorgehen ist offensichtlich unzulässig, da sich somit das Geschwindigkeitsniveau auf diesen Vorlaufstrecken evtl. aus diesem Umstand heraus von dem der übrigen Strecken unterscheidet, bei denen, wenn auch nur zu einem geringen Anteil, Lkw-Geschwindigkeiten in der Stichprobe enthalten sind.⁹ Somit stehen für einen Vergleich mit den aus der Literatur bekannten, neueren Geschwindigkeitsprognosemodellen (vgl. Ziffer 2.3.2) lediglich die Vorläufe zu den Abschnitten 4 und 14 zur Verfügung. Bei einem Vergleich zeigt sich u.U., ob sich durch die im Rahmen dieser Untersuchung vorgenommene Definition der frei Fahrenden (Bruttozeitlücke $t \geq 3$ s zum Vorausfahrenden) eine Beeinflussung durch die mit einer (Netto-) Zeitlücke $t < 4$ s nachfolgenden Fahrzeuge ergibt (vgl. Ziffer 5.4).

BAKABA (2005) gibt Referenzgeschwindigkeiten für 2-streifigen Landstraßen in Abhängigkeit der Kriterien Kurvigkeit [gon/km], Welligkeit [gon/km] und Fahrbahnbreite [m] an. Die mittlere Geschwindigkeit auf den Vorlaufstrecken Nr. 4 und 14 beträgt $V_m = 92$ km/h, die $V_{85} = 104$ km/h. Ein Blick auf die Linienführung zeigt für die Vorlaufstrecke zum Abschnitt 4 (vgl. Anhang Bild A 2.6), dass hier eine deutliche Richtungsänderung vorliegt. Eine kartenbasierte, grobe Abschätzung der Winkeländerung in der Kurve in Kombination mit der Vorlaufstreckenlänge ergibt eine Kurvigkeit von etwa 65 gon/km. Mit der gleichen groben Abschätzung wurde die Kurvigkeit der Vorlaufstrecke Nr. 14 zu etwa 45 gon/km ermittelt (vgl. Anhang Bild A 2.24). Bei beiden Strecken kann davon ausgegangen werden, dass die Welligkeit unter 15 gon/km und die Fahrbahnbreite über 6 m liegt. Der Arbeit von BAKABA lassen sich in Abhängigkeit von der Kurvigkeit und Welligkeit Referenzgeschwindigkeiten zwischen $75 \text{ km/h} \leq V_{85} \leq 105 \text{ km/h}$ entnehmen. Für eine Kurvigkeit $KU \leq 75$ gon/km, Welligkeit $WE \leq 15$ und Fahrbahnbreite $FB > 6$ m ergibt sich nach BAKABA eine Referenzgeschwindigkeit von $V_{85} = 105$ km/h. Somit kann von einer sehr guten Übereinstimmung mit der im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten V_{85} von 104 km/h für die Vorlaufstrecken 4 und 14 gesprochen werden.

⁹ Die Bestätigung dieser „Unzulässigkeit“ zeigt sich vor allem durch den KS-Test für die Vorlaufstrecken innerhalb einer 2+1-Strecke (vgl. Ziffer 8.5).

Dies trifft für das Geschwindigkeitsmodell von EBERSBACH (2006) nicht zu. In Bild 8.3 ist das von EBERSBACH (2006) entwickelte Geschwindigkeitsprognosemodell für Fahrbahnbreiten größer 6 m dargestellt. Ein sportlicher Fahrstil entspricht dabei der V_{85} , ein normaler dem 70 %-Quantil (V_{70}) und ein entspannter Fahrstil dem Median der von EBERSBACH (2006) angegebenen Geschwindigkeiten (V_{50}). Bild 8.3 zeigt, dass die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelte V_{85} von 104 km/h für die Vorlaufstrecken 4 und 14 nicht dem zugehörigen „sportlichen“ Fahrstil entsprechen. EBERSBACH (2006) selbst gibt an, dass für Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik zwar auch ein Zusammenhang zwischen der Kurvigkeit und der Geschwindigkeit ermittelt werden konnte, dieser jedoch im Gegensatz zum Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem Kurvenradius eines Einzelelements nur eine geringe statistische Sicherheit besitzt. Im Bereich geringer Kurvigkeiten passte EBERSBACH (2006) aus Plausibilitätsgründen die von ihm ermittelten Schätzfunktionen auf Grundlage früherer Forschungsarbeiten an. Diese Anpassung führt jedoch anscheinend zu einer Überschätzung der Geschwindigkeiten. Im vorliegenden Fall beträgt die Überschätzung 15 km/h. Diese Überschätzung kann nicht auf die unterschiedliche Definition der frei Fahrenden (vgl. Ziffer 5.4) zurückgeführt werden. Der Umstand, dass durch die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verwendete Definition der frei Fahrenden ein „Drängeln“ (Nettozeitlücke zum nachfolgenden Fahrzeug < 4 s) das Geschwindigkeitsverhalten der Pulkführer beeinflusst haben könnte, müsste zu einer Unterschätzung, jedoch nicht zu einer Überschätzung der Geschwindigkeiten führen. Die Ursache wird eher in den unterschiedlichen Zielsetzung, dieser und der Arbeit von EBERSBACH (2006) (vgl. Ziffer 2.3.2) gesehen.

Ob die Größenordnung der ermittelten Überschätzung rein zufällig oder verallgemeinerbar ist, kann auf der Grundlage der im Rahmen dieser Untersuchung vergleichbaren zwei Geschwindigkeitsmessreihen (die jedoch aus derselben Grundgesamtheit stammen) jedoch keinesfalls beurteilt werden.

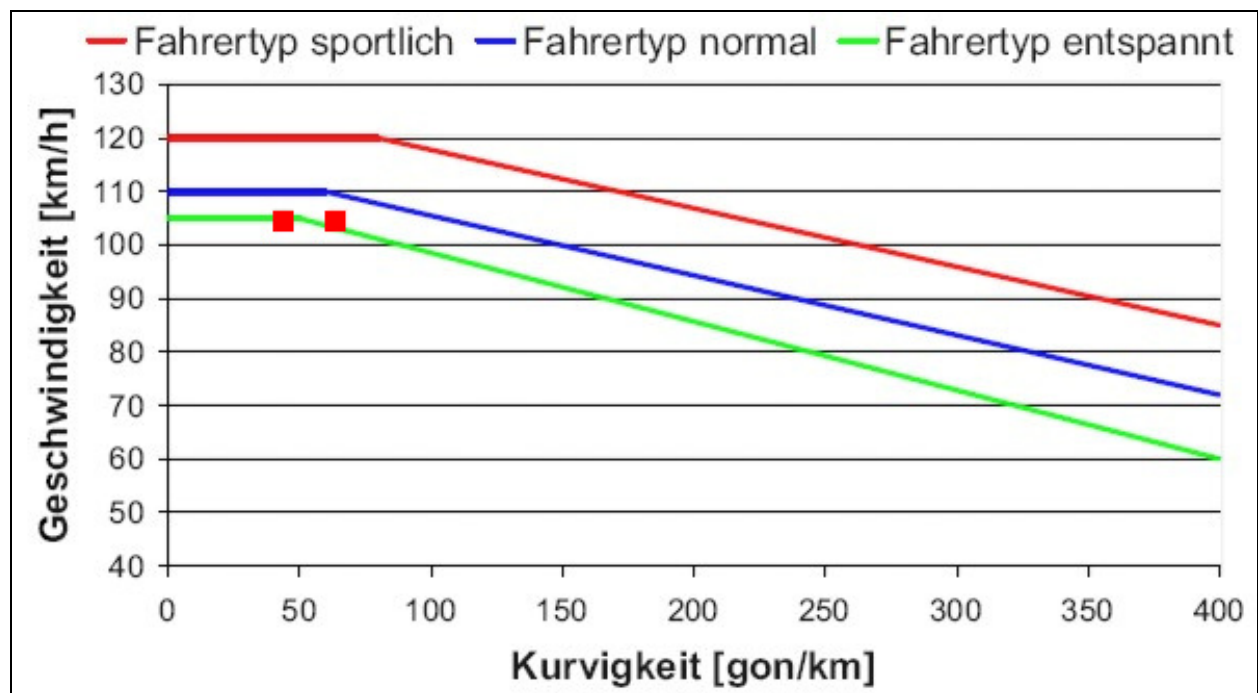


Bild 8.3: Vergleich der auf den Vorlaufstrecken 4 und 14 ermittelten Geschwindigkeiten V_{85} mit dem entsprechenden von EBERSBACH (2006) definierten Fahrstil „sportlich“

Fazit

Bei den Vorlaufstrecken, die sich außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke, vor Überholabschnitten an Pos. 1 befinden, konnte die Forderung nach einer möglichst einheitlichen Charakteristik der Vorlaufstrecken nur bedingt eingehalten werden (vgl. Ziffern 3). Aufgrund einer Vielzahl von Besonderheiten konnten lediglich die Geschwindigkeiten der Vorlaufstrecken 4 und 14 für weitere Analysen herangezogen werden. Diese beiden Messreihen stammen aus derselben Grundgesamtheit und können somit zusammengefasst werden.

Da es sich bei diesen Strecken um zweistreifige Querschnitte handelt, konnte eine Übertragbarkeit auf ausgewählte, aus der Literatur bekannte Geschwindigkeitsprognosemodelle überprüft werden. Ob die von BAKABA angegebenen Referenzgeschwindigkeiten dabei als valide zur Schätzung des Geschwindigkeitsverhaltens angesehen werden können, sollte nicht anhand der einen Überprüfung festgemacht werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen durchzuführen.

Ferner scheint es, dass der nachfolgende Verkehr die im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten frei Fahrenden in ihrer Geschwindigkeit nicht beeinflusst. Unter den gegebenen Randbedingungen (vor allem geringe Kurvigkeit und Welligkeit sowie große Fahrbahnbreite) können die Fahrzeugführer demnach ihre Geschwindigkeit unabhängig von dem zeitlichen Abstand der nachfolgenden Fahrzeuge verwirklichen und sehen sich nicht dazu veranlasst aufgrund des „Drängelns“ schneller als mit ihrer Wunschgeschwindigkeit zu fahren bzw. sehen sich die nachfolgenden Fahrzeuge aufgrund der im Vergleich zum Gro der Landstraßen relativ hohen Geschwindigkeiten der Vorfahrenden nicht zu einem „Drängeln“ veranlasst. Dies erfolgt evtl. auch, da eine Vielzahl der nachfolgenden Fahrzeugführer aufgrund von Ortskenntnis weiß, dass „demnächst“ eine gesicherte Überholmöglichkeit in Form der 2+1-Strecke folgt.

8.5 Geschwindigkeitsverhalten auf den Vorlaufstrecken innerhalb einer 2+1-Strecke

Der KS-Test zeigt für die Vorlaufstrecken, die sich innerhalb einer 2+1-Strecke befinden, dass bis auf den Vorlauf zum Abschnitt 12 alle übrigen Strecken (Nr. 2, 3, 7 und 15) aus der gleichen Grundgesamtheit stammen und sich demnach die Unterschiede aus den Stichproben nur „zufällig“ ergeben haben (vgl. Anhang Ziffer A 3.3.2). Bei der **Vorlaufstrecke Nr. 12** ist zu beachten, dass aufgrund des Ergebnisses des χ^2 -Tests (vgl. Ziffer 8.2) die Lkw-Geschwindigkeiten aus der Stichprobe entfernt wurden und so nur Pkw-Geschwindigkeiten für den KS-Test herangezogen wurden. Dieses Vorgehen ist offensichtlich unzulässig, da sich somit das Geschwindigkeitsniveau auf dieser Vorlaufstrecke allein aus diesem Umstand heraus von dem der übrigen Strecken unterscheidet, bei denen, wenn auch nur zu einem geringen Anteil, Lkw-Geschwindigkeiten in der Stichprobe enthalten sind. Als Konsequenz aus dieser Erkenntnis verbleiben somit für die weiteren Betrachtungen zu den Vorlaufstrecken, die sich innerhalb einer 2+1-Strecke befinden, die **Vorlaufstrecken Nr. 2, 3, 7 und 15**.

Die von BRANNOLTE, BASELAU und DONG identifizierten Einflüsse aus der **Position**¹⁰ sowie der **Länge der Vorlaufstrecke** konnten aufgrund des Ergebnisses des KS-Tests somit nicht bestä-

¹⁰ Man beachte die unterschiedliche Definition der Position von BRANNOLTE, BASELAU und DONG. Die im Rahmen dieser Arbeit bezeichnete Vorlaufstrecke außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke (vor Pos. 1) haben BRANNOLTE, BASELAU und DONG nicht betrachtet. Sie bezeichnen mit „Pos. 1“ den 1. Vorlauf innerhalb der 2+1-Strecke.

tigt werden. So muss beispielsweise für die Länge der Vorlaufstrecke festgestellt werden, dass mit dem zur Verfügung stehenden Längenspektrum von 1.100 bis 1.800 m für die Vorläufe innerhalb einer 2+1-Strecke ein Einfluss nicht nachgewiesen werden konnte. Bei BRANNOLTE, BASELAU und DONG zeigte sich hingegen bei einer 1.800 m langen Vorlaufstrecke im Vergleich zu einer 1.200 m langen Vorlaufstrecke eine um 2,0 km/h niedrigere Reisegeschwindigkeit.

Es ist jedoch zu beachten, dass im Rahmen dieser Arbeit lediglich eine Stichprobe der frei fahrenden Fahrzeuge gemessen wurde, während BRANNOLTE, BASELAU und DONG die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit aller den Abschnitt durchfahrenden Fahrzeuge erhoben haben. Eine direkte Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen von BRANNOLTE, BASELAU und DONG bezüglich der Reisegeschwindigkeiten ist somit nicht gegeben. Wunschgeschwindigkeiten wurden von BRANNOLTE, BASELAU und DONG auf Vorlaufstrecken nicht erhoben.

Da sich Vorlaufstrecken, die sich innerhalb der 2+1-Strecke befinden, nicht signifikant unterscheiden, zeigt sich auch kein Einfluss auf das Geschwindigkeitsniveau durch die bei der Untersuchungsstrecke 1 (B 210 OU Jever, Vorlaufstrecken 2 und 3) im Seitenraum aufgestellten Hinweistafeln, die vor Geschwindigkeitskontrollen auf dieser Strecke warnen (vgl. Anhang Ziffer A 2.2).

Über das **Geschwindigkeitsniveau auf Vorlaufstrecken, innerhalb einer 2+1-Strecke** ($n = 400$) können folgende Erkenntnisse festgehalten werden:

- Die maximale gemessene Geschwindigkeit innerhalb des Untersuchungskollektivs zur Beschreibung des Geschwindigkeitsniveaus auf Vorlaufstrecken, die sich innerhalb der 2+1-Strecke befinden (Nr. 2, 3, 7 und 15), beträgt $V_{\max} = 132$ km/h. Sie liegt damit um 7 km/h unterhalb der auf allen Vorlaufstrecken gemessenen Höchstgeschwindigkeit (vgl. Tabelle 8.2).
- Das arithmetische Mittel beträgt $V_m = 91,3$ km/h mit einer Standardabweichung von $s = 11,4$ km/h.
- Die V_{85} liegt mit 102 km/h unter Berücksichtigung des Messfehlerbereichs des Radargeräts (vgl. Ziffer 5.4) im Bereich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h.
- Somit liegt der Anteil an Fahrzeugen, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschritten haben, bei etwa 15 %.
- „Exzessivgeschwindigkeiten“ treten nahezu nicht auf. Mit marginalen 0,25 % kann ihr Anteil vernachlässigt werden.

Bei einem Vergleich des Geschwindigkeitsverhaltens auf allen in der Untersuchung verbliebenen Vorlaufstrecken Nr. 2, 3, 7 und 15 (innerhalb) sowie 4 und 14 (außerhalb) zeigt der KS-Test bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von lediglich 1 % ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. Dieses Ergebnis verwundert, da die Vorlaufstrecken außerhalb einer 2+1-Strecke sich vor allem im Hinblick auf die Fahrbahnbreite zu den Vorlaufstrecken innerhalb einer 2+1-Strecke unterscheiden. Da Vorlaufstrecken außerhalb der 2+1-Strecke lediglich zweistreifig sind, ist die Fahrbahnbreite demzufolge deutlich geringer als beim dreistreifigen RQ 15,5 einer 2+1-Strecke. Der Einfluss dieses Umstands konnte jedoch im Rahmen der durchgeführten Analyse nicht nachgewiesen werden bzw. scheint sich unter den gegebenen Randbedingungen der geringen Kurvigkeit und Längsneigung nicht signifikant auswirken.

8.6 Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten auf den Überholfahrstreifen

Mit Verweis auf Ziffer 3, wo die bei der Auswahl der Untersuchungsstrecken bzw. -abschnitte zu beachtenden und konstant zu haltenden Merkmale genannt sind, kann festgehalten werden, dass die im Rahmen dieser Untersuchung erhobenen Geschwindigkeiten auf den Überholfahr-

streifen im Hinblick auf die maßgeblichen Einflussfaktoren Längsneigung, Kurvigkeit bzw. Linienführung und Fahrbahnbreite (vgl. Ziffer 2.3.2) weitestgehend unter gleichartigen Bedingungen gemessen wurden. Speziell im Hinblick auf 2+1-Strecken gilt es jedoch noch weitere Einflussgrößen zu beachten.

Nach BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) übt beispielsweise auch die **Position des Überholabschnitts** einen Einfluss auf die von ihnen erhobenen Reisegeschwindigkeiten der den zweistreifigen Abschnitt durchfahrenden Fahrzeuge aus. Demnach liegt die Reisegeschwindigkeit auf dem Abschnitt an Pos. 1 um 3,3 bzw. 4,0 km/h über der in den Abschnitten an Pos. 2 bzw. 3.

Die **Länge der Überholabschnitte** übt nach BRANNOLTE, BASELAU und DONG ebenfalls einen Einfluss auf die Reisegeschwindigkeiten aus. Im Vergleich zu der Referenzlänge von 1.200 m liegt demnach die Reisegeschwindigkeit auf einem 2.000 m langen Überholabschnitt um 2 km/h höher bzw. auf einem 800 m langen Überholabschnitt um 2,5 km/h niedriger.

Bei beiden Aspekten ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Arbeit lediglich eine Stichprobe der frei fahrenden Fahrzeuge auf dem Überholfahrstreifen gemessen wurde (vgl. Ziffer 5.4), während BRANNOLTE, BASELAU und DONG Reisezeitmessungen durchführten. Ein Vergleich mit den Reisegeschwindigkeiten von BRANNOLTE, BASELAU und DONG ist somit nicht möglich.

Dies gilt auch im Hinblick auf die von BRANNOLTE, BASELAU und DONG erhobenen Wunschgeschwindigkeiten. Da lediglich Geschwindigkeitsverteilungen für die Gesamtheit aller betrachteten 2+1-Strecken sowie einer einzelnen 2+1-Strecke angegeben werden, deren Messung an einer nicht mehr zu rekonstruierenden Messstelle im ersten Überholabschnitt der Messstrecke B 54 erfolgte (vgl. dazu Ziffer 2.3.3), muss mit dem Hinweis auf die in Ziffer 2.3.2 beschriebene Problematik zur Vergleichbarkeit von verschiedenen lokalen Messquerschnitten festgehalten werden, dass ein Vergleich mit den im Rahmen dieser Untersuchung erhobenen Geschwindigkeiten nicht möglich ist.

Ein Zusammenhang wird auch zwischen dem Geschwindigkeitsverhalten auf den entsprechenden Vorlaufstrecken und dem auf den nachfolgenden Überholfahrstreifen vermutet. Da jedoch sowohl für die Überholabschnitte an Pos. 1 ($n_{\bar{U}=1}=5$) als auch nicht an Pos. 1 ($n_{\bar{U}>1}=7$) jeweils nur etwa die Hälfte der **Geschwindigkeiten auf den Vorlaufstrecken** als „brauchbar“ angesehen werden kann ($n_{V=1}=2$ bzw. $n_{V>1}=4$, vgl. Ziffern 8.4 und 8.5), sind keine signifikanten Ergebnisse im Rahmen von Regressionsanalysen zu erwarten und somit ist dieser Einfluss auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis nicht direkt zu ermitteln.

Hinweise auf das Geschwindigkeitsniveau auf der Vorlaufstrecke bzw. der Pulkführer kann jedoch eine Betrachtung der Vorlaufstreckenlänge und/oder des SV-Anteils liefern.

Bei Überholabschnitten, denen vergleichsweise **längere Vorlaufstrecken** vorangehen (dies kann jedoch nur bei Überholabschnitten an Pos. 1 vorkommen), wird ein relativ niedriges Geschwindigkeitsniveau der Überholenden aufgrund eines geringen Geschwindigkeitsniveaus der frei Fahrenden auf längeren Vorlaufstrecken erwartet. Diese Erwartung konnte zwar im Rahmen der Analysen zum Geschwindigkeitsverhalten auf den Vorlaufstrecken zu Abschnitten an Pos. 1 nicht statistisch abgesichert werden (vgl. Ziffer 8.4), begründet sich aber aus dem Umstand, dass viele der auf diesen längeren Vorlaufstrecken erfassten Pulkführer sehr langsam sind. Ursächlich dafür ist, dass die auf kürzeren Vorlaufstrecken als frei Fahrende erfassten etwas schnelleren Pulkführer aufgrund der Länge der Vorlaufstrecke auf die sehr Langsamen auffahren und somit auf den längeren Vorlaufstrecken nicht mehr als frei fahrende Pulkführer erhoben

wurden. Somit überholen im nachfolgenden Überholabschnitt dann auch eine Vielzahl von relativ langsamen Fahrzeugen die sehr langsamen Pulkführer und es ergibt sich ein insgesamt vergleichsweise niedriges Geschwindigkeitsniveau der Überholenden.

Auf Strecken mit einem vergleichsweise hohen **SV-Anteil** ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass auch viele „langsame“ Pkw die „noch langsameren“ Schwerverkehrsfahrzeuge überholen. Diese Vermutung kann insbesondere durch eine detaillierte Betrachtung der kumulierten Summenhäufigkeit der Geschwindigkeiten auf dem Überholfahrstreifen im Abschnitt 13 (vgl. Anhang Ziffer A 3.1) gestützt werden. Hier beträgt der Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge, die mit einer Geschwindigkeit von lediglich bis zu 80 km/h überholen, 22 %. Mit durchschnittlich etwa 30 % SV-Anteil im Auswertungszeitraum weist dieser Abschnitt den mit Abstand höchsten SV-Anteil aller Überholabschnitte auf. Mit weitaus weniger, aber immerhin noch 11 %, der mit bis zu 80 km/h überholenden Fahrzeuge, fällt der Überholfahrstreifen des Abschnitts Nr. 3 ebenfalls auf. Mit einem durchschnittlichen SV-Anteil von 11,2 % gehört dieser Überholabschnitt zu den stärker vom SV belasteten Abschnitten. Auf allen anderen Überholfahrstreifen beträgt der Anteil an Überholenden mit einer Geschwindigkeit von bis zu 80 km/h höchstens 3 %.

Eine Sonderstellung nimmt die in der Literatur ebenfalls als maßgebliche Einflussgröße auf das Geschwindigkeitsverhalten genannte **Verkehrsstärke** (meist in Form von DTV [Kfz/h]) ein. Ein Einfluss der Verkehrsstärke ist jedoch nur dann zu erwarten, wenn das Geschwindigkeitsverhalten aller Fahrzeuge, die eine Strecke befahren, gemessen wird. Im Allgemeinen ist mit zunehmender Verkehrsstärke dann auch ein Rückgang des Geschwindigkeitsniveaus, i.d.R. ausgedrückt durch die Reisegeschwindigkeit, verbunden (vgl. u.a. BRANNOLTE, BASELAU und DONG). Ursächlich ist dafür, dass sich die Anzahl der nicht mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren könnenden Fahrzeugführer vergrößert und aufgrund der gestiegenen Anzahl von entgegenkommenden Fahrzeugen die Möglichkeiten zum Überholen geringer werden. Sollte jedoch lediglich das Geschwindigkeitsverhalten der von anderen Verkehrsteilnehmern möglichst unbeeinflussten fahrenden Fahrzeuge erhoben werden (wie im Rahmen dieser Untersuchung), übt die Verkehrsstärke keinen Einfluss aus.

Ein möglicher Einfluss der **Ausbildung des Beginns eines Überholabschnitts** (Fahrstreifenaddition oder unkritischer Wechsel) kann mittels des gewählten Messaufbaus (jeweils 400 m vor dem Ende) nicht überprüft werden. Eine Vermutung könnte lauten, dass bei der Ausbildung mit Fahrstreifenaddition vermehrt auch langsame Fahrzeuge überholen, da sie sich schon auf dem linken Fahrstreifen befinden und sich somit nicht erst zu einem kompletten Überholvorgang, der mit einem Ausscheren beginnt, entschließen müssen. Diese Fahrzeuge werden jedoch i.d.R., bis sie die Messstelle 400 m vor dem Ende erreichen, bereits wieder auf den rechten Fahrstreifen eingeschert sein. Somit läge hier dann die gleiche Situation vor wie bei der Ausbildung des Beginns als unkritischer Wechsel.

Aufgrund der aus der Literatur gewonnenen Erkenntnisse sowie den o.g. Ausführungen sollen speziell im Hinblick auf das Geschwindigkeitsverhalten auf den Überholfahrstreifen von 2+1-Strecken

- die Lage,
- die Längen der Überholabschnitte,
- die Vorlaufstreckenlängen und
- der SV-Anteil (während der Spitzenstunde)¹¹

als mögliche Einflussgrößen in Betracht gezogen werden. Mittels der beiden Letztgenannten soll der vermutete Einfluss des Geschwindigkeitsniveaus auf der Vorlaufstrecke auf das Geschwindigkeitsniveau der im anschließenden Überholabschnitt erfassten Überholenden indirekt überprüft werden. Um die maßgeblichen Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten auf den Überholfahrstreifen von 2+1-Strecken identifizieren zu können, werden im Folgenden KS-Tests sowie Regressionsanalysen durchgeführt (vgl. Ziffer 6.6.4).

Ein Vergleich mit den Geschwindigkeitsmessungen von WEBER und LÖHE (2003) kann ebenfalls nicht erfolgen. Zwar könnte anhand der aus den Nachfolgefahrten erstellten Geschwindigkeitsprofile die V_{85} an jedem beliebigen und somit auch an dem entsprechend dieser Untersuchung gewählten Querschnitt 400 m vor dem Ende des Überholabschnitts abgelesen werden (vgl. Ziffer 2.3.3), jedoch ist zu beachten, dass es sich innerhalb der Überholabschnitte bei den frei Fahrenden sowohl um Überholende als auch um Überholte handelt. Auch mit den Querschnittsmessungen von WEBER und LÖHE lässt sich kein Vergleich durchführen. Hier wurden wie auch bei BRANNOLTE, BASELAU und DONG alle Kraftfahrzeuge erhoben.

8.6.1 Überholabschnitte an Pos. 1

Im Hinblick auf die Position des Überholabschnitts wurde beim KS-Test lediglich zwischen Abschnitten an Pos. 1 bzw. nicht an Pos. 1 differenziert. Für die Überholabschnitte an Pos. 1 zeigt der KS-Test (vgl. Anhang Ziffer A 3.3.2), dass sich die Geschwindigkeiten der Abschnitte 4, 6 und 14 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % nur zufällig unterscheiden und aus einer Grundgesamtheit stammen. Gleiches gilt für die Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen der Abschnitte 8 und 10. Wie unter Ziffer 8.1 bzw. 8.2 aufgeführt, handelt es sich dabei um Überholabschnitte, denen Vorläufe mit auf das Geschwindigkeitsverhalten auf den Vorlaufstrecken relevanten Besonderheiten vorausgehen.

Die Vorlaufstrecke Nr. 8 ist mit einer Länge von 3.500 m die Längste und durch vergleichsweise hohe Pulkanteile und Pulkängen gekennzeichnet (vgl. Ziffern 10.3.4 und 10.4.5). Durch den beidseitig angeordneten Mehrzweckstreifen und die dadurch überbreite Fahrbahn weist diese Vorlaufstrecke das höchste Geschwindigkeitsniveau aller Vorlaufstrecken auf (vgl. Tabelle 8.2).

Der Vorlauf zum Untersuchungsabschnitt 10 ist mit 2.600 m Abstand zum nächsten davor gelegenen Knotenpunkt die zweitlängste Vorlaufstrecke. Die Mitteltrennung mittels Schutzplanken muss ebenfalls als Besonderheit im Hinblick auf das Geschwindigkeitsverhalten auf der Vorlaufstrecke betrachtet werden. Dieser Einfluss zeigt sich im insgesamt niedrigen Geschwindig-

¹¹ Die Spitzenstunde entspricht i.d.R. zwar nicht dem Zeitraum der Geschwindigkeitsmessungen. Es wird aber davon ausgegangen, dass der SV-Anteil während der Spitzenstunde eine charakteristische Größe ist, um das Verhältnis der SV-Anteile der verschiedenen Untersuchungsabschnitte untereinander zu beschreiben.

keitsniveau auf dieser Vorlaufstrecke. Auf keiner anderen Vorlaufstrecke wurde eine derart geringe V_{85} ermittelt (vgl. Tabelle 8.2).

Somit kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Vorlaufstreckenlänge das alleinige Kriterium für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf den Vorlaufstrecken an Pos. 1 ist. Da jedoch auch der Vorlaufstreckenlänge eine gewisse Wirkung zugesprochen wird, können Aussagen lediglich für Überholabschnitte getroffen werden, bei denen die Länge der Vorlaufstrecken $L_{\text{Vorlauf}} \leq 2.000$ m beträgt. Die mittlere Geschwindigkeit auf diesen Überholfahrstreifen wurde zu $V_m = 113,5$ km/h bzw. die V_{85} zu 126,0 km/h ermittelt. Die Standardabweichung beträgt bei diesen Überholabschnitten $s = 14,1$ km/h.

Das geringe Geschwindigkeitsniveau auf den Überholfahrstreifen, denen eine „lange“ Vorlaufstrecke ($L_{\text{Vorlauf}} \geq 2.600$ m) vorangeht, lässt sich für die Geschwindigkeiten auf dem Überholfahrstreifen des Untersuchungsabschnitts 10 plausibel durch das vergleichsweise geringe Geschwindigkeitsniveau auf der Vorlaufstrecke Nr. 10 (geringste Geschwindigkeiten aller Vorlaufstrecken) begründen (vgl. Tabelle 8.2). Aufgrund der Länge der Vorlaufstrecke handelt es sich zum einen bei den frei fahrenden Fahrzeugführern um vergleichsweise viele Pulkführer, da einzelne frei fahrende Fahrzeuge i.d.R. im Verlauf der Strecke auf einen Pulk aufgefahren sind. Zum anderen sind viele der auf dieser Vorlaufstrecke erfassten Pulkführer sehr langsam. Ursächlich dafür ist, dass die auf kürzeren Vorlaufstrecken als frei Fahrende erfassten etwas schnelleren Pulkführer aufgrund der Länge der Vorlaufstrecke auf die sehr Langsamen auffahren und somit auf den längeren Vorlaufstrecken nicht mehr als frei Fahrende erhoben wurden. Im nachfolgenden Überholabschnitt überholen dann auch eine Vielzahl von relativ langsamen Fahrzeugen die sehr langsamen Pulkführer. Dadurch ergibt sich insgesamt ein vergleichsweise niedriges Geschwindigkeitsniveau der Überholenden. Diese Beobachtungen bestätigen somit die unter Ziffer 8.6 formulierte Erwartung, dass das Geschwindigkeitsniveau der frei Fahrenden auf der Vorlaufstrecke das Geschwindigkeitsniveau der im anschließenden Überholabschnitt erfassten Überholenden maßgeblich beeinflusst.

Die angesprochene Erwartung kann für die Erklärung der (niedrigen) Geschwindigkeiten auf dem Überholfahrstreifen des Untersuchungsabschnitts 8 nicht herangezogen werden. Denn die Geschwindigkeiten auf der Vorlaufstrecke Nr. 8 sind nicht wie beim Vorlauf Nr. 10 vergleichsweise niedrig, sondern die höchsten Geschwindigkeiten auf allen Vorlaufstrecken. Die Ursache dafür ist in Ziffer 8.1 erläutert (Mehrzweckstreifen). Die Interpretation dieses Ergebnisses lautet, dass hier neben den Pulkführern auch eine Vielzahl von frei fahrenden Fahrzeugführern erfasst wurde, die durch die Besonderheiten des Querschnitts der Vorlaufstrecke die Pulkführer bereits auf der Vorlaufstrecke überholt haben. Dabei wird es sich oftmals um risikofreudige und stark motorisierte Fahrer gehandelt haben. Im nachfolgenden Überholabschnitt überholen dann nur noch solche (Pulk-) Fahrzeuge, denen trotz des Mehrzweckstreifens ein Überholen auf der Vorlaufstrecke zu riskant erschien. Dabei wird es sich oft um einen von Fahrertyp her „entspannten“ Fahrer mit u.U. geringerem Motorisierungsgrad gehandelt haben. Somit liegt die Ursache für das relativ geringe Geschwindigkeitsniveau auf dem Überholfahrstreifen des Abschnitts Nr. 8 weniger in der Länge der Vorlaufstrecke begründet (da dann in Analogie zur Vorlaufstrecke Nr. 10 die Geschwindigkeiten dort relativ gering sein müssten), sondern vielmehr an dem als Besonderheit vorliegenden Querschnitt der Vorlaufstrecke Nr. 8.

Der Einfluss der Vorlaufstreckenlänge auf die Geschwindigkeiten der Pulkführer ließ sich jedoch anhand der Vorlaufstrecke zum Abschnitt Nr. 10 im Vergleich mit den übrigen Abschnitten an Pos. 1 plausibel nachweisen. Ein statistisch abgesicherter Zusammenhang zwischen der Länge

der Vorlaufstrecken vor Abschnitten an Pos. 1 und den sich daraus ergebenden Geschwindigkeiten auf diesen Vorlaufstrecken konnte jedoch aufgrund einer Vielzahl von Faktoren nicht nachgewiesen werden (vgl. Ziffer 8.4).

Da dieser Einfluss jedoch offensichtlich der dominante Faktor auf die Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen der Abschnitte an Pos. 1 ist, führen weder einfache noch mehrfache Regressionen zu weiterführenden Erkenntnissen bezüglich der Schätzung der Geschwindigkeiten der Überholenden auf Abschnitten an Pos. 1. Insbesondere gilt dies auch für die Regressionen mit der Geschwindigkeit auf der Vorlaufstrecke aufgrund der oben beschriebenen Unterschiede zwischen den Geschwindigkeiten auf den Vorlaufstrecken Nr. 8 und 10 sowie den nur wenigen geeigneten Geschwindigkeitsmessungen auf den Vorlaufstrecken.

Auch der vermutete Einfluss der Länge der Überholabschnitte auf die Kenngrößen des Geschwindigkeitsverhaltens konnte nicht nachgewiesen werden. Ursächlich dafür ist jedoch auch die geringe Stichprobe von lediglich $n=5$ geeigneten Geschwindigkeitsmessungen für Überholabschnitte an Pos. 1.

Abschließend ist festzuhalten, dass für das Geschwindigkeitsniveau auf den Überholfahrstreifen an Pos. 1 lediglich für solche Abschnitte Erkenntnisse gewonnen werden konnten, bei denen die Vorlaufstreckenlänge $L_{\text{Vorlauf}} \leq 2.000$ m gilt. Die nachfolgend aufgeführten Kenngrößen zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens entstammen dabei von den drei Abschnitten Nr. 4, 6 und 14 ($n=300$).

- Die maximale gemessene Geschwindigkeit innerhalb des Untersuchungskollektivs zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Überholfahrstreifen an Pos. 1, denen Vorlaufstrecken mit $L_{\text{Vorlauf}} \leq 2.000$ m vorangehen (Nr. 4, 6, 14), beträgt $V_{\text{max}} = 169$ km/h. Sie ist die höchste auf allen Überholfahrstreifen gemessene Geschwindigkeit (vgl. Tabelle 8.1).
- Das arithmetische Mittel beträgt $V_m = 113,5$ km/h mit einer Standardabweichung von $s = 14,1$ km/h.
- Die V_{85} beträgt 126 km/h.
- Der Anteil an Fahrzeugen, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h überschritten haben, beträgt insgesamt 85 %. Anders: Lediglich 15 % der Überholenden auf den Abschnitten an Pos. 1 hielten sich 400 m vor dem Ende beim Überholvorgang an die zulässige Höchstgeschwindigkeit,
- Es treten auch eine Reihe von „Exzessivgeschwindigkeiten“ ($V > 130$ km/h) auf. Ihr Anteil beträgt nahezu 10 %.

Für Überholabschnitte, denen längere Vorlaufstrecken vorangehen, steht lediglich eine geeignete Geschwindigkeitsmessung zur Verfügung (Nr. 10). Aufgrund der Besonderheiten der Vorlaufstrecke zum Abschnitt Nr. 8 und den sich daraus ergebenden Konsequenzen auf das Geschwindigkeitsniveau auf der Vorlaufstrecke können diese nicht auf andere „längere“ Vorlaufstrecken übertragen werden (auch wenn sie im Hinblick auf die Geschwindigkeiten der Überholenden denselben Effekt erzielen). Um das Geschwindigkeitsniveau auf den Überholfahrstreifen an Pos. 1, denen längere Vorlaufstrecken ($L_{\text{Vorlauf}} > 2.000$ m) vorangehen, statistisch abgesichert zu beschreiben, sollten auf solchen Abschnitten und vor allem auf deren Vorlaufstrecken noch weitere Untersuchungen erfolgen.

8.6.2 Überholabschnitte nicht an Pos. 1

Für die Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen, die sich nicht an Pos. 1 befinden, sind die anhand des KS-Tests ermittelten Unterschiede (vgl. Anhang Ziffer A 3.3.2) nicht so offensichtlich zu erklären wie bei den Überholfahrstreifen an Pos. 1 (vgl. Ziffer 8.6.1).

Auch die einfachen Regressionsanalysen mit der **absoluten Position der Überholabschnitte**, die sich nicht an Pos. 1 befinden (Pos. 2, 3 oder 4, $n=7$) und den Kenngrößen des Geschwindigkeitsverhaltens auf den Überholfahrstreifen (V_m , V_{85} bzw. s) zeigen keine signifikanten ($\alpha=0,05$) Ergebnisse (vgl. Ziffer 6.6.4). Gleiches gilt für die einfachen Regressionen mit der **Länge der Überholabschnitte**.

Das Längenspektrum der Vorlaufstrecken zu Überholabschnitten, die sich nicht an Pos. 1 befinden, ist mit $1.100 \text{ m} \leq L_{\text{Vorlauf}} \leq 1.800 \text{ m}$ relativ eng gefasst. Hinzu kommt, dass bei den Überholabschnitten an Pos. 1 bis zu einer **Vorlaufstreckenlänge** von 2.000 m kein Einfluss auf die Geschwindigkeiten der Überholenden ausgemacht werden konnte (vgl. Ziffer 8.6.1). Somit verwundert auch das Ergebnis der einfachen Regressionsanalyse mit der Vorlaufstreckenlänge auf die Kenngrößen des Geschwindigkeitsverhaltens der im anschließenden Abschnitt Überholenden nicht. Während sich der Regressor bei den Regressionen auf die V_m bzw. V_{85} als nicht signifikant zeigt ($\alpha=0,05$), liefert die Regression auf s aufgrund der Bedingung $k=0$ (mit k =„Konstante“ der Regressionsgerade) eine ungeeignete Schätzfunktion als Ergebnis. Die Regression durch den Ursprung führt dazu, dass das Bestimmtheitsmaß negativ wird (Was per Definition nicht sein darf! Vgl. Gleichung 6.2). Dies bedeutet, dass die Residuen eine größere Varianz besitzen als die originalen Messwerte (vgl. Ziffer 6.6.4). Der Grund dafür ist eine fehlgeschlagene Optimierung (PETZOLDT, 2003). Anders: Da die „gefittete“ Gerade durch den Ursprung „gezwängt“ wird, liegt sie dann neben den „Punkten“.

Im Gegensatz zu den drei bisher betrachteten Regressoren zeigt sich der **SV-Anteil** bei der einfachen linearen Regression auf die mittlere Geschwindigkeit V_m der Überholenden als signifikant (P -Wert = 0,042, vgl. Ziffer 6.6.4). Für die V_{85} und die Standardabweichung s gilt dies wiederum nicht. Bild 8.4 zeigt das Ergebnis der Regression auf V_m . Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,596$ zeigt sich ein eindeutiger Trend: Auf den Überholfahrstreifen, die nicht an Pos. 1 liegen, nimmt mit zunehmendem SV-Anteil das Geschwindigkeitsniveau auf dem Überholfahrstreifen ab, weil der Anteil der „langsamen“ Überholenden ebenfalls ansteigt (vgl. Ziffer 8.6).

Aufgrund der oben aufgeführten Erläuterungen zur Länge der Vorlaufstrecke werden diese bei den folgenden mehrfachen (multiplen) Regressionsanalysen nicht in den Modellen als mögliche Regressoren berücksichtigt. Mit Bezug auf die Erkenntnisse zum Einfluss des SV-Anteils anhand der einfachen Regressionen werden nur Kombinationen mit dem SV-Anteil betrachtet.

Wie in Ziffer 6.6.4 angeführt, gilt es bei einem mehrfachen Regressionsansatz bei einer Modellreduktion zur Identifikation der relevanten Einflüsse eine evtl. vorhandene Multikollinearität zwischen den Regressoren zu beachten. Zwischen den potentiellen Einflussfaktoren absolute Position und Länge des Überholabschnitts sowie SV-Anteil muss im Hinblick auf die Multikollinearität dieser Merkmale untereinander festgehalten werden, dass mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,01$ zwischen der absoluten Position und dem SV-Anteil in der vorliegenden Datenbasis ein signifikanter, wenn auch schwacher Zusammenhang besteht ($R^2=0,340$). Bei den zur Verfügung stehenden Daten verhält es sich so, dass der SV-Anteil mit ansteigender Position zunimmt. Ursächlich dafür ist, dass der höchste vorliegende SV-Anteil in einem Überholab-

schnitt auftrat, der sich (zufällig) an Position 4 befindet (Untersuchungsabschnitt Nr. 13, vgl. Tabelle 7.1). Diesen Umstand gilt es bei einer Interpretation der Modellreduktionen zu beachten.

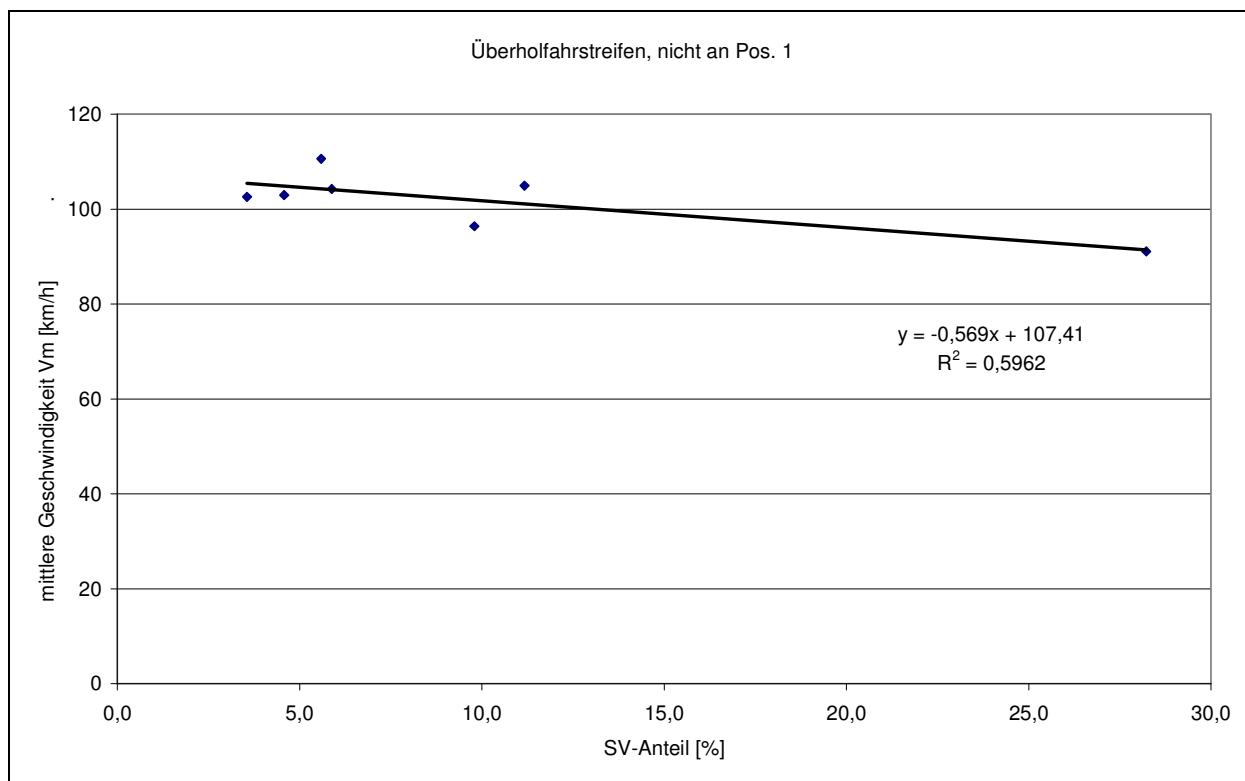


Bild 8.4: Zusammenhang zwischen dem SV-Anteil und der mittleren Geschwindigkeit V_m auf dem Überholabschnitt von Abschnitten, die sich nicht an Pos. 1 befinden

Als zusammenfassendes Ergebnis der multiplen Regressionsanalysen mit den drei Regressoren absolute Position und Länge des Überholabschnitts sowie SV-Anteil muss festgehalten werden, dass lediglich eine der im Rahmen der Modellreduktionen getesteten Kombinationen ein signifikantes Modell liefert. Die Schätzung der Standardabweichung s anhand der absolute Pos. und Länge des Überholabschnitts (P -Wert = 0,033 bzw. 0,032) kann dabei jedoch nur mit einem äußerst schwachen Bestimmtheitsmaß von $R^2 < 0,1$ erfolgen. Die (äußerst schwache) Tendenz deutet auf einen Anstieg der Standardabweichung s und somit inhomogeneres Geschwindigkeitsniveau der Überholenden bei Abschnitten, die sich an den hinteren Positionen innerhalb einer 2+1-Strecke befinden, und/oder bei längeren Überholabschnitten hin.

Fazit

Auf Basis der vorliegenden Datengrundlage ist eine Prognose des Geschwindigkeitsverhaltens auf den Überholabschnitten, die sich nicht an Pos. 1 einer 2+1-Strecke befinden, nicht möglich.

Das Bestimmtheitsmaß zur Schätzung der Standardabweichung s auf den Überholabschnitten der Abschnitte, die sich nicht an Pos. 1 befinden, ist unzureichend, um hieraus Erkenntnisse z.B. im Hinblick auf eine maximale Länge der Überholabschnitte unter der Zielvorgabe eines möglichst homogenen Geschwindigkeitsniveaus ableiten zu können.

8.7 Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und Exzessivgeschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen

Anhand Tabelle 8.1 ist zu erkennen, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h auf den Überholfahrstreifen der Untersuchungsabschnitte zum Teil deutlich überschritten wird. Die sehr hohen Geschwindigkeiten können auf den breiten Fahrbahnquerschnitt, die zügige Trassierung und den hohen Ausbaustandard der Untersuchungsstrecken zurückgeführt werden. Zahlreiche Untersuchungen über die Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten bestätigen diese Zusammenhänge (vgl. z.B. BAKABA, 2005, SCHMIDT, 1996).

Im Rahmen der folgenden Arbeitsschritte werden die Zusammenhänge zwischen den dem Verkehrsplaner bekannten Kenngrößen auf den Anteil an Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit sowie die Vorkommenshäufigkeit von Exzessivgeschwindigkeiten mittels (multipler) Regressionsanalysen (vgl. Ziffer 6.6.4) untersucht. Ziel ist es, daraus ggf. sicherheitstechnische Empfehlungen bzgl. des Ausbaustandards im Allgemeinen bzw. insbesondere der Länge von zweistreifigen Überholabschnitten von 2+1-Strecken abzuleiten.¹² Dazu werden Regressionen der Kenngrößen (Regressanden oder Schätzgrößen)

- Anteil an Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit $V_{zul} = 100$ km/h sowie
- Vorkommenshäufigkeit von Exzessivgeschwindigkeiten $V > 130$ km/h

auf die dem Verkehrsplaner zur Verfügung stehenden, d.h. bekannten Regressoren

- (absolute) Position der Überholabschnitte,
- Länge der Überholabschnitte,
- SV-Anteil während der Spitzenstunde¹¹ sowie
- Pulkanteil während der Spitzenstunde¹³

durchgeführt. In Analogie zur Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens auf den Überholfahrstreifen (vgl. Ziffer 8.6) soll anhand des SV-Anteils indirekt der Einfluss des Geschwindigkeitsniveaus auf der Vorlaufstrecke auf das Geschwindigkeitsniveau der im anschließenden Überholabschnitt erfassten Überholenden analysiert werden.

Neben einfachen Regressionen werden wiederum auch multiple (lineare) Regressionen mit anschließender Modellreduktion durchgeführt (vgl. Ziffer 6.6.4). Demnach gilt auch hier: Ist der P-Wert kleiner als das festgelegte Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$, bedeutet dies, dass auch der aus dem Modell „reduzierte“ Regressor signifikant notwendig ist, um den jeweiligen Schätzwert zu erklären. Er muss somit im Modell verbleiben.

Da das Ziel der Analysen in der Identifikation eines Längeneinflusses liegt, wurde im Rahmen der einfachen Regressionsanalysen auch nur die Länge der Überholabschnitte den Regressan-

¹² Für die Vorlaufstrecken wird eine solche Analyse nicht durchgeführt. Durch die Vielzahl von zu berücksichtigenden Besonderheiten reduziert sich die Anzahl an Untersuchungsabschnitten für die Regressionsanalysen auf ein derart geringes Maß, dass vor allem bei der multiplen Regressionsanalyse keine signifikanten Ergebnisse zu erwarten sind. So sind allein schon bei der multiplen Regression mit zwei Regressoren mindestens 4 Beobachtungswerte n erforderlich, um den P-Wert ermitteln zu können.

¹³ Die Spitzenstunde entspricht i.d.R. zwar nicht dem Zeitraum der Geschwindigkeitsmessungen. Es wird aber davon ausgegangen, dass der Pulkanteil, wie auch der SV-Anteil, während der Spitzenstunde eine charakteristische Größe ist, um das Verhältnis der Pulkanteile der verschiedenen Untersuchungsabschnitte untereinander zu beschreiben.

den gegenübergestellt. Bei den multiplen Regressionen wurden nur solche Kombinationen bzw. Modelle betrachtet, die die Länge enthalten.

Im Hinblick auf die multiplen Regressionsanalysen wurden die verwendeten Regressoren bezüglich einer Multikollinearität getestet. Es konnten jedoch keine Zusammenhänge zwischen den Regressoren identifiziert werden.

8.7.1 Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit

Im Rahmen der einfachen Regressionen auf den Anteil an Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zeigten sich zwar die Länge der Überholabschnitte und der SV-Anteil als signifikant ($\alpha=0,05$) zur Erklärung des Regressanden. Während jedoch die Regression mit dem SV-Anteil nur ein äußerst schwaches Bestimmtheitsmaß aufweist ($R^2=0,313$), ist die Schätzfunktion mit der Länge der Überholabschnitte durch die Bedingung $k=0$ ungeeignet den Schätzwert zu bestimmen (vgl. Ziffer 8.6.2).

Für die multiplen (linearen) Regressionen auf den Anteil an Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit muss, wie schon bei den (multiplen) Regressionsanalysen zum Geschwindigkeitsverhalten, festgestellt werden, dass sich der Regressand mittels der betrachteten Regressoren und der vorliegenden Datenbasis nicht schätzen lässt. Die Länge der Überholabschnitte zeigte sich zwar bei einigen Kombinationen als signifikant ($\alpha=0,05$), jedoch nie ein weiterer der im jeweiligen Modell enthaltenen Regressoren. Dennoch wurden diese Modelle (mit einer signifikanten Länge der Überholabschnitte und insignifikanten anderen Regressoren) hinsichtlich der Güte der Anpassung analysiert. Jedoch auch diese Betrachtungen waren ergebnislos. Der durch die Modelle erklärte Anteil der Varianz an der ursprünglichen Varianz war stets sehr gering ($R^2 < 0,5$).

8.7.2 Vorkommenshäufigkeit von Exzessivgeschwindigkeiten

Im Rahmen der einfachen Regressionen auf den Anteil an Exzessivgeschwindigkeiten zeigten sich zwar die Länge der Überholabschnitte und der Pulkanteil als signifikant ($\alpha=0,05$) zur Erklärung des Regressanden. Dabei weist jedoch die Regression mit der Länge der Überholabschnitte nur ein äußerst schwaches Bestimmtheitsmaß auf ($R^2 < 0,05$) und die Regression mit dem Pulkanteil führt durch die Bedingung $k=0$ dazu, dass die Schätzfunktion ungeeignet ist, den Schätzwert zu bestimmen (vgl. Ziffer 8.6.2).

Für die multiplen (linearen) Regressionen auf den Anteil an Exzessivgeschwindigkeiten muss, wie schon bei den (multiplen) Regressionsanalysen zum Geschwindigkeitsverhalten sowie zu den Anteilen an Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, festgestellt werden, dass sich der Regressand mittels der betrachteten Regressoren und der vorliegenden Datenbasis nicht schätzen lässt. Die Länge der Überholabschnitte zeigte sich zwar bei einigen (wenigen) Kombinationen als signifikant ($\alpha=0,05$), jedoch nie ein weiterer der im jeweiligen Modell enthaltenen Regressoren. Dennoch wurden diese Modelle (mit einer signifikanten Länge der Überholabschnitte und insignifikanten anderen Regressoren) hinsichtlich der Güte der Anpassung analysiert. Jedoch auch diese Betrachtungen waren ergebnislos. Der durch die Modelle erklärte Anteil der Varianz an der ursprünglichen Varianz war stets sehr gering ($R^2 < 0,2$).

8.8 Zusammenfassung der Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens auf 2+1-Strecken

Die Geschwindigkeitsanalyse mittels des KS-Tests hat gezeigt, dass es i.d.R. signifikante Unterschiede im Geschwindigkeitsniveau zwischen den Untersuchungsabschnitten und den dazugehörigen Vorlaufstrecken gibt (vgl. Ziffer 8.3). Dabei wird erwartungsgemäß auf dem Überholfahrstreifen deutlich schneller gefahren als auf der Vorlaufstrecke (vgl. Tabelle 8.1 und Tabelle 8.2). Dies entspricht auch den Beobachtungen anderer Untersuchungen (z.B. BICKELHAUPT, 1991, LINDNER, 1988, SCHAECHTERLE und LINDNER, 1987).

Auf Grundlage der vorliegenden Arbeit lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen zum Geschwindigkeitsniveau auf einbahnigen zweistreifigen Landstraßen (entspricht den Vorlaufstrecken vor Überholabschnitten an Pos. 1) ableiten. Dies war jedoch auch kein primäres Ziel der durchgeführten Untersuchung. Hierfür könnten jedoch die Erkenntnisse aus der Literatur und die dort entwickelten Modelle zur Prognose der Geschwindigkeiten auf zweistreifigen Außerortsstraßen zur Anwendung kommen (vgl. Ziffer 8.4).

Im Gegensatz zu den Geschwindigkeiten auf Vorlaufstrecken außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke konnten für Vorlaufstrecken innerhalb einer 2+1-Strecke allgemeingültige Aussagen (unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen) auf der Basis von 4 Abschnitten (= 400 Fahrzeugen) erarbeitet werden (vgl. Ziffer 8.5).

Für das Geschwindigkeitsniveau auf den Überholfahrstreifen an Pos. 1 konnten für solche Abschnitte, bei denen die Vorlaufstreckenlänge $L_{\text{Vorlauf}} \leq 2.000$ m beträgt, auf der Basis von drei Abschnitten ($n=300$) ebenfalls verallgemeinerbare Erkenntnisse gewonnen werden (vgl. Ziffer 8.6.1).

Im Gegensatz dazu ist auf Basis der vorliegenden Datengrundlage eine Prognose des Geschwindigkeitsverhaltens auf den Überholfahrstreifen, die sich nicht an Pos. 1 einer 2+1-Strecke befinden, nicht möglich (Vgl. Ziffer 8.6.2). Somit fehlt eine wichtige Eingangsgröße, um ein Modell für die Pulkauflösung zu entwickeln, da der Überholweg maßgeblich von der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Pulkführern und den Überholenden abhängt (vgl. vor allem ROOS, 1989).

Die Geschwindigkeitsanalyse hat gezeigt, dass (wie aus der Literatur bekannt) überwiegend eine erhebliche Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf den Überholfahrstreifen der Untersuchungsabschnitte zu beobachten ist. Der Anteil der Fahrzeuge, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschritten, lag dabei zwischen 21 % und 95 % (vgl. Tabelle 8.1).

Auf den Vorlaufstrecken innerhalb einer 2+1-Strecke beträgt der Anteil der Geschwindigkeitsübertretungen unter Berücksichtigung von Vorlauf Nr. 12 (vgl. Ziffer 8.5) max. 26% (vgl. Tabelle 8.2). Auf den Vorlaufstrecken außerhalb der 2+1-Strecke mussten hingegen weitaus höhere Anteile an Geschwindigkeitsübertretungen registriert werden. Das Spektrum reicht dabei von lediglich 2 % auf dem Vorlauf Nr. 10 (Schutzplanken, vgl. Ziffer 8.2.1) bis hin zu 48 % auf der Vorlaufstrecke Nr. 8 (Mehrzweckstreifen, vgl. Ziffer 8.1). Auf den Vorlaufstrecken Nr. 4 und 14, die auch für einen Vergleich mit den Geschwindigkeitsprognosemodellen aus der Literatur geeignet waren (vgl. Ziffer 8.4), betrugen die Anteile 32 % bzw. 20 %.

Ein Vergleich mit dem Anteil an Geschwindigkeitsübertretungen auf 4 Abschnitten der im Rahmen des von der BAST und dem BMVBS betreuten Projekts „Verbesserung der Verkehrssicher-

heit auf einbahnigen, zweistreifigen Außerortsstraßen“ (AOSI)¹⁴ betrachteten einbahnig zweistreifigen Landstraßen zeigt, dass von den insgesamt ca. 150.000 erfassten frei fahrenden Pkw (Definition gemäß BAKABA, 2005 bzw. EBERSBACH, 2006) vor der Einrichtung der ortsfesten Geschwindigkeitsüberwachungsanlagen etwa 23 % die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h überschritten hatten. Lediglich bei 2 der insgesamt 8 Messungen (je Fahrtrichtung eine) lag nur ein Anteil unterhalb von 18 % vor. Bei den übrigen schwankte das Spektrum zwischen 18 % und 38 %.

Somit kann festgehalten werden, dass der Anteil an Geschwindigkeitsübertretungen sowohl auf den Vorlaufstrecken außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke als auch innerhalb vergleichbar mit dem Anteil auf „normalen“ einbahnig zweistreifigen Landstraßen ist. Zusätzlich wird diese Erkenntnis durch die von der BAST durchgeführten Testmessungen im Rahmen des Projekts „Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsverteilung und Unfallgeschehen auf Landstraßen – Konzeptstudie“¹⁴ gestützt. Demnach liegen die Anteile an Geschwindigkeitsübertretungen auf den 5 für diese Fragestellung geeigneten Abschnitten auf Bundesstraßen i.d.R. zwischen 20 % und 35 %.

Trotz oder gerade wegen dieser Erkenntnis war es auf der Grundlage der vorliegenden Daten nicht möglich, eine minimale bzw. optimale Länge der Überholabschnitte (und/oder Vorlaufstrecken)¹² in Abhängigkeit des Anteils an Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abzuleiten (vgl. Ziffer 8.7.1). Gleiches gilt in Abhängigkeit des Anteils an Exzessivgeschwindigkeiten (vgl. Ziffer 8.7.2).

9 Überholverhalten

Für die Betrachtung des Überholverhaltens wurden ausschließlich die Abschnitte herangezogen, bei denen mehr als 75% der Abschnittslänge videotechnisch erfasst und ausgewertet werden konnte (vgl. Ziffer 5.2). Bei den Untersuchungsabschnitten 2, 3 und 8 konnte diese Bedingung nicht eingehalten werden. Die Auswertungen zu den Überhol- bzw. den Ein- und Ausschervorgängen basieren somit auf der in der Tabelle 9.1 dargestellten Datengrundlage.

Bei der Analyse der Ein- und Ausschervorgänge am Beginn und Ende muss festgehalten werden, dass bei den Untersuchungsabschnitten 7, 13 und 15 am Beginn jeweils die zweiten 100 m nicht eingesehen werden konnten. Beim Untersuchungsabschnitt 12 konnten aufgrund ungünstiger Lichtverhältnisse nur die letzten 150 m vor der Sperrfläche eingesehen werden. Weiterhin konnte an diesem Untersuchungsabschnitt die Sperrfläche am Ende nicht in die Untersuchung einbezogen werden. Bei allen anderen, d.h. auch den Abschnitten 2, 3 und 8 war dies uneingeschränkt möglich.

9.1 Verteilung der Ein- und Ausschervorgänge über die gesamte Länge

Bei der Auswertung der Ein- und Ausschervorgänge wurde zunächst deren Verteilung über die gesamte Länge der Untersuchungsabschnitte betrachtet. Das Bild 9.1 zeigt beispielhaft die Verteilung der Ausschervorgänge auf dem Untersuchungsabschnitt 1. Der nicht erfasste Bereich

¹⁴ vgl. http://www.bast.de/cln_005/nn_42716/DE/Forschungsprojekte/laufende/fp-laufend-v1.html (Stand: 31.10.2007)

zwischen 700 und 800 m konnte dabei nicht ausgewertet werden. Alle weiteren Ergebnisse bezüglich der Verteilung der Aus- und Einschervorgänge sind im Anhang Ziffer A 4 dargestellt.

Untersuchungsabschnitt	L	Erfasster Bereich	Beobachtungszeitraum	q_{\max}	Gesamtanzahl Einscherer	Gesamtanzahl Ausscherer
	[m]	[%]	[h]	[Kfz/h]	[Fz]	[Fz]
1	1.474	92	3,0	752	747	319
4	1.092	82	3,0	483	557	97
5	1.687	100	3,0	622	979	344
6	1.706	94	3,0	821	842	438
7	828	76	4,0	1.293	1.334	240
9	1.195	92	3,5	1.162	1.137	266
10	895	78	4,0	962	1.199	126
11	1.296	77	4,0	1.159	1.458	575
12	929	95	3,5	1.155	1.178	1.674
13	1.146	76	3,5	496	664	669
14	1.258	92	4,0	465	598	420
15	1.353	82	3,0	782	847	827
Summe			41,5		11.515	5.995

Tabelle 9.1: Datengrundlage für die Betrachtungen zu den Ein- und Ausschervorgängen

Die qualitative Analyse der Verteilung der Ein- und Ausschervorgänge über die gesamte Länge konnte keine Auffälligkeiten oder Zusammenhänge mit der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil, der Länge der Untersuchungsabschnitte oder der Geschwindigkeit (V_{85}) nachweisen.

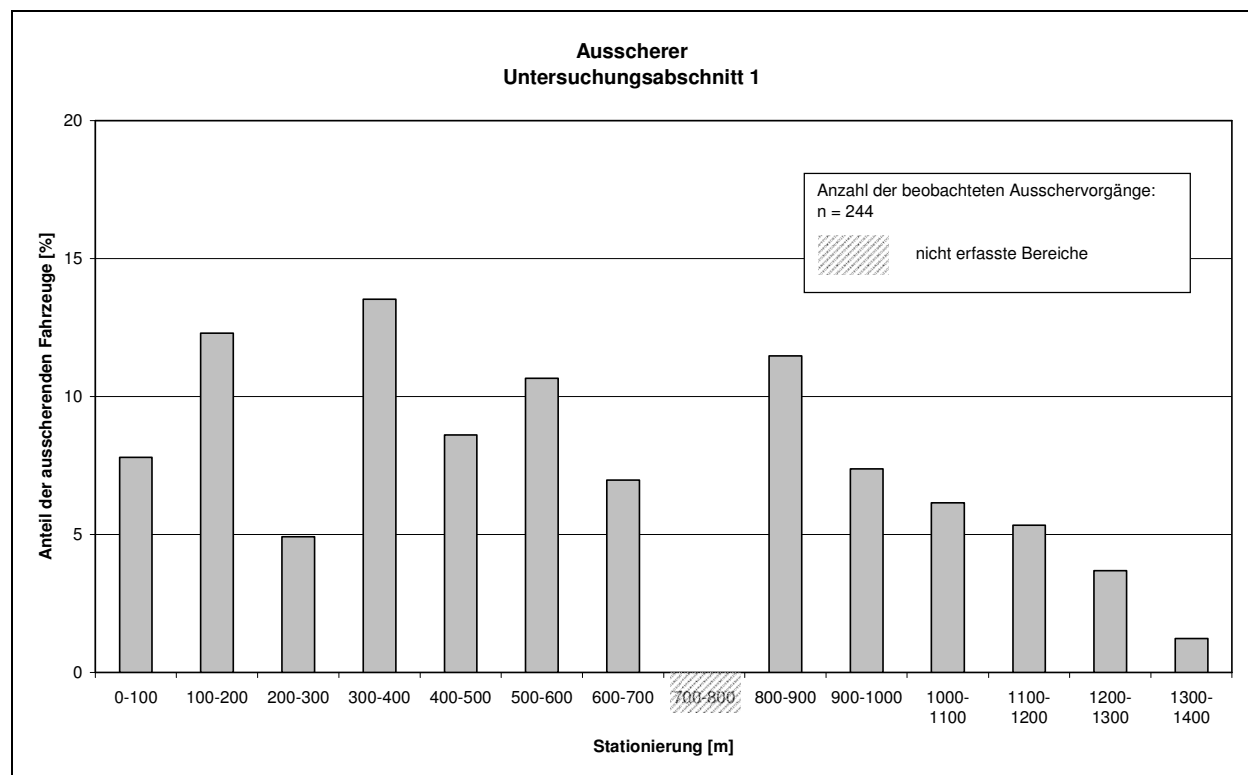


Bild 9.1: Verteilung der Ausschervorgänge auf der Länge des Untersuchungsabschnitts 1

9.2 Überholvorgänge

In einem weiteren Analyseschritt wurden Zusammenhänge zwischen den vermuteten Einflussgrößen

- Verkehrsstärke,
- SV-Anteil,
- Länge des Überholabschnitts,
- (absolute) Position des Überholabschnitts innerhalb der 2+1-Strecke sowie
- Ausbildung des Beginns als Fahrstreifenaddition oder unkritischer Wechsel

mit der Anzahl der Überholvorgänge ermittelt. Die Ausbildung des Beginns geht dabei als „Dummy-Variable“ in die Modellbildung ein. Da die Vermutung lautet, dass bei der Ausbildung des Beginns als unkritischer Wechsel weniger Überholvorgänge stattfinden als bei der Ausbildung mit Fahrstreifenaddition und für die Abschnitte mit Fahrstreifenaddition die größere Stichprobe zur Verfügung steht, wird diesen der Wert „0“ zugeordnet. Der unkritische Wechsel am Beginn erhält dementsprechend den Wert „1“.

Zur Darstellung der Datenbasis dient Bild 9.2. Es zeigt den erwartungsgemäßen Anstieg der Überholvorgänge bei zunehmender Verkehrsstärke.

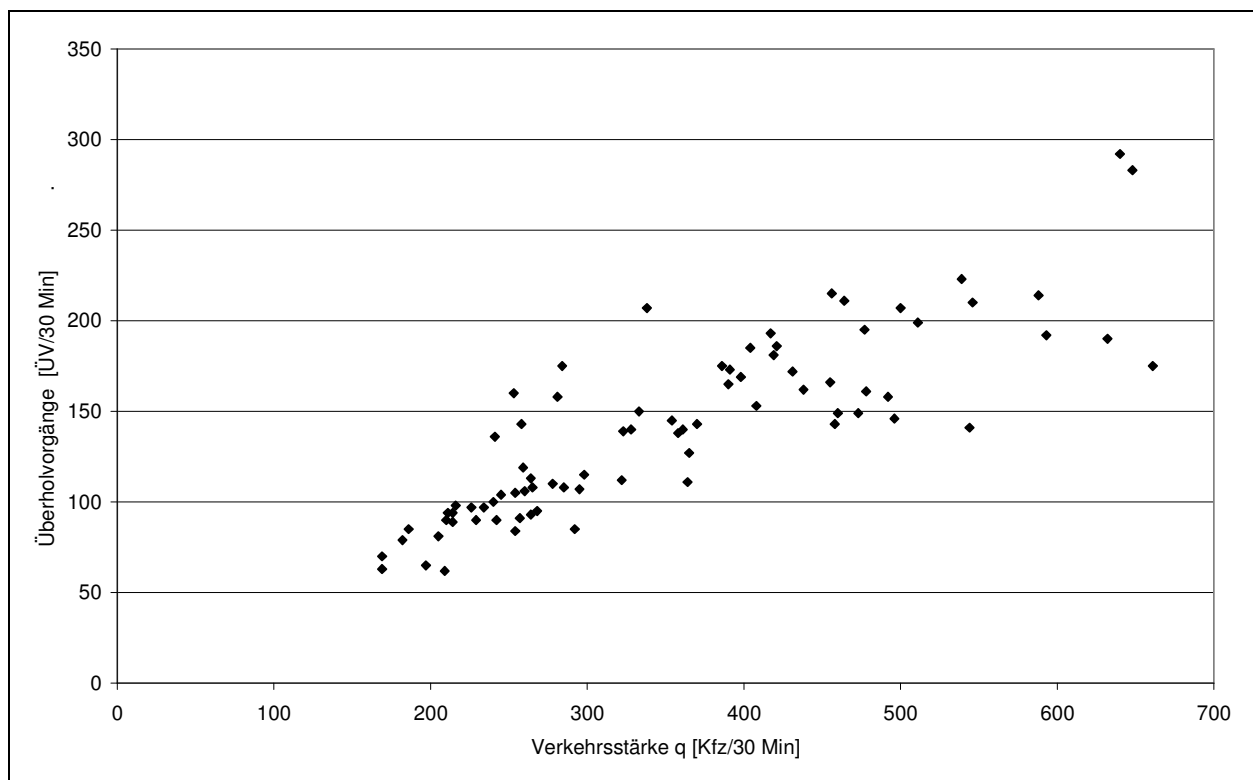


Bild 9.2: Verkehrsstärke und Anzahl der Überholvorgänge

Die lineare Mehrfach-Regression zeigt, dass bei der Kombination mit der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge des Überholabschnitts alle drei Regressoren auf dem 0,05-Niveau signifikant erforderlich sind, um den Regressanden zu schätzen. Das in Gleichung 9.1 dargestellte Ergebnis der Regressionsanalyse zeigt dabei erwartungsgemäß, dass mit zunehmender Verkehrsstärke und/oder zunehmendem SV-Anteil und/oder länger werdendem Überholabschnitt auch die Anzahl der Überholvorgänge zunimmt.

Aufgrund teilweiser Multikollinearität zwischen den in Gleichung 9.1 enthaltenen Regressoren und der Position des Überholabschnitts bzw. der Ausbildung des Beginns als Fahrstreifenaddition oder unkritischem Wechsel kann nicht davon ausgegangen werden, dass diese beiden Faktoren keinen Einfluss auf die Anzahl der Überholvorgänge ausüben (vgl. Ziffer 6.6.4). So besteht denn auch bei der einfachen Regression der Ausbildung des Beginns auf die Anzahl der Überholvorgänge zwar ein äußerst schwacher jedoch mit einem P-Wert von 0,019 signifikanter Zusammenhang in der Art, dass bei den Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, tendenziell mehr Überholvorgänge stattfinden als bei den Abschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen. Dieser Umstand bestätigt die Vermutung (vgl. Ziffer 8.6), dass sich bei den Überholabschnitten mit Fahrstreifenaddition Fahrzeuge eher dazu entschließen, den Pulkführer zu überholen, da sie nicht erst einen Fahrstreifenwechsel nach links (Ausscheren) vornehmen müssen (vgl. Ziffer 3). Ein signifikanter ($\alpha=0,05$) Einfluss der Position zeigt sich bei der einfachen Regression auf die Anzahl der Überholvorgänge nicht (P-Wert=0,651).

Gleichung 9.1: $y = + 0,410 x_1 + 0,837 x_2 + 0,072 x_3 - 102,910$ ($R^2 = 0,843$)

mit:

y = Überholvorgänge [ÜVG/30 Min]
 x_1 = Verkehrsstärke [Kfz/30 Min]
 x_2 = SV-Anteil [%]
 x_3 = Länge des Überholabschnitts [m]

In einem nächsten Analyseschritt wurde aufgrund dieser Erkenntnisse die Datenbasis in Abhängigkeit der Ausbildung des Beginns aufgeteilt und erneut Regressionen mit der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge der Überholabschnitte auf die Anzahl der Überholvorgänge vorgenommen. Gleichung 9.2 zeigt das Ergebnis für die Überholabschnitte, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen. Für die Schätzung der Anzahl der Überholvorgänge zeigen sich alle drei Regressoren auf dem 0,05-Niveau als signifikant.

Gleichung 9.2: $y_{FSA} = + 0,378 x_1 + 1,559 x_2 + 0,071 x_3 - 97,151$ ($R^2 = 0,778$)

mit:

y_{FSA} = Überholvorgänge bei Überholabschnitten mit Beginn als FS-Addition [ÜVG/30 Min]
 x_1 = Verkehrsstärke [Kfz/30 Min]
 x_2 = SV-Anteil [%]
 x_3 = Länge des Überholabschnitts [m]

Für die Überholabschnitte, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, gelingt die Modellbildung nicht. Hierbei müssten die Regressoren SV-Anteil und Länge der Überholabschnitte zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ aus dem Modell ausgeschlossen werden.

Fazit

Mittels Gleichung 9.2 lässt sich die Anzahl der Überholvorgänge auf Überholabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, anhand der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge der Überholabschnitte schätzen.

Da kein Modell für die Abschnitte, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, entwickelt werden konnte und auch der einfache Zusammenhang zwischen der Ausbildung des Beginns und der Anzahl der Überholvorgänge nur äußerst schwach ausgeprägt ist ($R^2 < 0,1$), kann aus diesen Ergebnissen keine Prognose der Anzahl der Überholvorgänge für diese Abschnitte vorgenommen oder abgeleitet werden.

9.3 Ein- und Ausschervorgänge am Beginn und am Ende

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden die Ein- und Ausschervorgänge am Beginn und am Ende der Untersuchungsabschnitte analysiert. Dafür wurden die ersten bzw. letzten 200 m der Untersuchungsabschnitte mit einer Genauigkeit von mind. 50 m betrachtet.¹⁵ Das Bild 9.3 zeigt beispielhaft die Einschervorgänge am Ende des Untersuchungsabschnitts 7. Alle weiteren Ergebnisse bezüglich der Ein- und Ausschervorgänge am Beginn und am Ende der Untersuchungsabschnitte sind im Anhang Ziffer A 4 dargestellt.

Die Betrachtung der Verteilungen der Ein- und Ausschervorgänge am Beginn bzw. am Ende der Überholabschnitte führt zu den nachfolgend beschriebenen Ergebnissen.

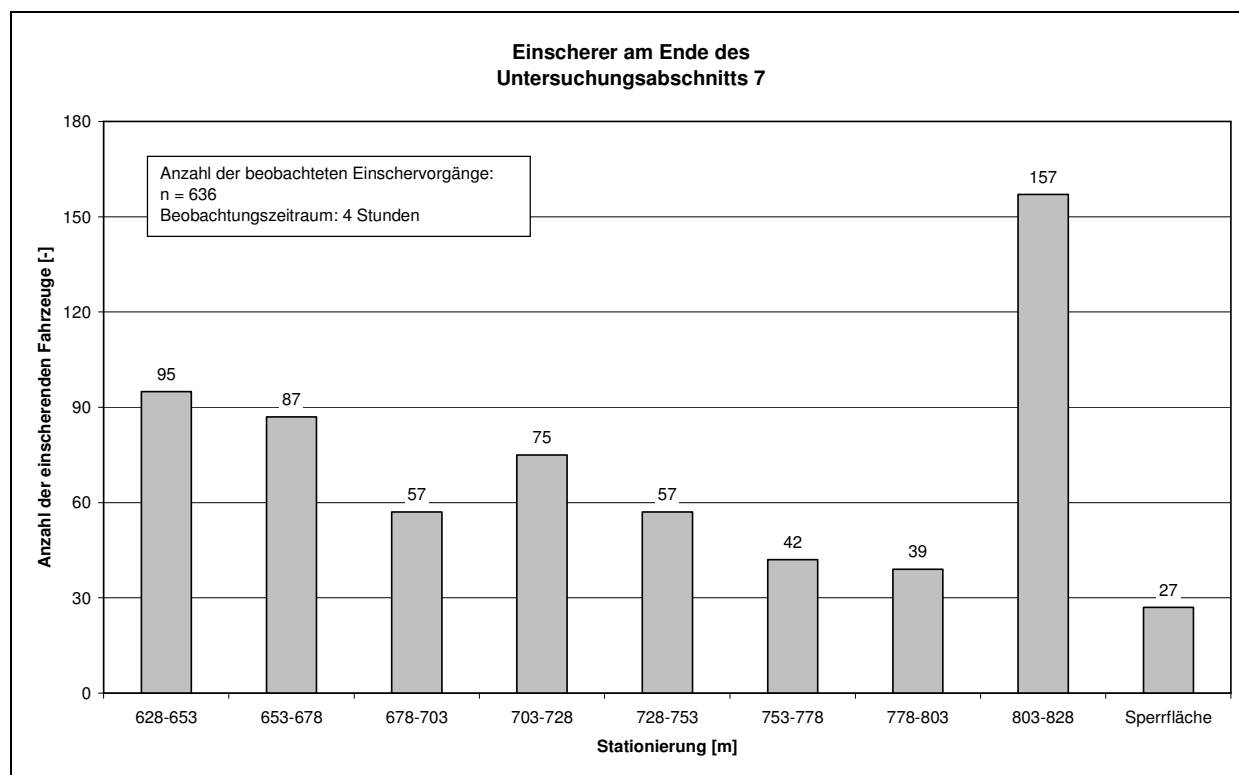


Bild 9.3: Verteilung der Einschervorgänge am Ende des Untersuchungsabschnitts 7

9.3.1 Sperrflächenüberfahrten am Beginn

Ein Einschervorgang vor dem eigentlichen Beginn der Überholabschnitte mit Fahrstreifenaddition, ist theoretisch möglich, indem der Bereich der durchgezogenen Fahrstreifenbegrenzung (Zeichen 295 StVO) von Fahrzeugen des Durchgangsstroms überfahren wird. Praktisch trat dieser Fall allerdings nie auf.

Ausschervorgänge vor dem eigentlichen Beginn der Überholabschnitte wurden auf allen Untersuchungsabschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen beobachtet (Nr. 12 bis 15). Bei den Abschnitten mit einer Fahrstreifenaddition zu Beginn (Nr. 1 bis 11) scherten Fahrzeuge aus dem Einfahrstrom nur bei den Untersuchungsabschnitten 4, 7 sowie 11 bereits im Bereich der durchgezogenen Fahrstreifenbegrenzung aus. Während der Untersuchungsabschnitt 4 mit

¹⁵ Angestrebt waren 25 m. Diese Bedingung konnte jedoch nicht bei allen Untersuchungsabschnitten eingehalten werden.

1.092 m Länge nicht zu den sehr kurzen Abschnitten zu zählen ist, stellt Abschnitt 7 mit nur 828 m Länge den kürzesten der betrachteten Untersuchungsabschnitte dar, was eine Erklärung für das Überfahren im Bereich der durchgezogenen Fahrstreifenbegrenzung liefern könnte. Am Untersuchungsabschnitt 11 wurden die meisten Ausschervorgänge im Bereich der Fahrstreifenbegrenzung verzeichnet. Dieser Untersuchungsabschnitt weist einen relativ großen Einfahrstrom mit einer Vielzahl von Schwerverkehrsfahrzeugen und gleichzeitig eine ungewöhnlich lange Fahrstreifenbegrenzung am Beginn auf ($L = 75$ m). Die Länge dieses Abschnitts beträgt 1.296 m und ist somit zu den Abschnitten mit einer mittleren Abschnittslängen zu zählen.

Bei den Untersuchungsabschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, mussten am Untersuchungsabschnitt 13 108 Überfahrten in 3,5 Stunden verzeichnet werden. Dieser Untersuchungsabschnitt weist mit 28,2 % gleichzeitig einen besonders hohen SV-Anteil auf. Auch am Untersuchungsabschnitt 12 wurden auffällig viele Sperrflächenüberfahrten (77 in 3,5 Stunden) beobachtet. Auf diesem Untersuchungsabschnitt wurden eine hohe Verkehrsstärke und ein hoher SV-Anteil verzeichnet. Beim Untersuchungsabschnitt 15 überfahren nur 8 Fahrzeuge in 3,0 Stunden die Sperrfläche vor dem eigentlichen Beginn des Überholabschnitts. Beim Untersuchungsabschnitt 14 existiert am Beginn keine Sperrfläche. Hier ist der Beginn als einfache Aufweitung ausgebildet (vgl. Anhang Bild A 2.26). Dass hier keine Sperrflächenüberfahrten am Beginn auftraten, ist demnach trivial.

9.3.2 Ein- und Ausschervorgänge am Beginn

Bei Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, geht einem Überholvorgang nicht zwangsläufig ein Ausscheren voraus (vgl. u.a. Ziffer 4.3). Dementsprechend ist es sehr gut möglich, dass bereits auf den ersten 200 m ein Einscheren stattfindet. Da jedoch auch der Pulkführer (aus der durchgehenden Vorlaufstrecke) einen gewissen Fahrweg zurücklegt, bevor er einschert (vgl. Ziffer 11.1) sind nur wenige Einschervorgänge auf den ersten 100 m zu erwarten.

Es zeigt sich, dass das Einscheren (nach einem Überholvorgang) bis zu 100 m nach dem Beginn bei Untersuchungsabschnitten mit Fahrstreifenaddition (Nr. 1 bis 11) ein seltenes Ereignis ist. Mit 3,2 bzw. 6,0 % Anteil der Einschervorgänge auf den ersten 100 m an allen beobachtbaren Einschervorgängen sind lediglich zwei Abschnitte (Nr. 10 und 11) auffällig. Diese zwei Abschnitte sind insgesamt durch einen relativ hohen SV-Anteil im Einfahrstrom gekennzeichnet (in der Spitzenstunde 10,5 bzw. 28,4%).

Bei Abschnitten, die mit einer unkritischen Wechsel beginnen, muss dem Einschervorgang ein Ausscheren vorangegangen sein. Somit ist i.d.R. nicht zu erwarten, dass dies bereits auf den ersten 200 m vollzogen werden kann. So zeigt sich denn auch einzig Untersuchungsabschnitt 12 dahingehend auffällig, dass hier verhältnismäßig viele Fahrzeuge bereits wieder zwischen den Stationen 100 m und 200 m einscheren. Mit in der Spitze über 1.100 Kfz/h und Richtung ist dieser Überholabschnitt der am stärksten belastete der Abschnitte mit unkritischem Wechsel (vgl. Tabelle 7.1). Gleichzeitig ist er aber auch mit einer Länge von nur 929 m der kürzeste Überholabschnitt dieses Kollektivs (vgl. Tabelle 3.1).

Im Hinblick auf die Ausschervorgänge am Beginn der Überholabschnitte wird bei Untersuchungsabschnitten mit Fahrstreifenaddition erwartet, dass die Anzahl der Ausschervorgänge auf den ersten 200 m maßgeblich von der Verkehrsstärke im Überholabschnitt abhängt, da sich der einfahrende Strom mit dem aus der Vorlaufstrecke durchfahrenden Strom „vermischen“ muss. Bei den Abschnitten mit einem unkritischen Wechsel am Beginn, wird der Zeitpunkt der Ausschervorgänge eher von dem sich auf der Vorlaufstrecke gebildeten Überholdruck (vgl. Zif-

fer 1.1) abhängen. Bei beiden Untersuchungskollektiven soll aber auch der mögliche Einfluss der Länge der Überholabschnitte überprüft werden. Erwartet wird, dass bei kürzeren Abschnitten die Anteile derjenigen Fahrzeuge, die bereits auf den ersten 200 m ihren Überholvorgang einleiten, höher als auf längeren Abschnitten sind. Somit könnten sich daraus evtl. Hinweise auf eine minimale Abschnittslänge ableiten lassen.

Aufgrund der Unterschiede im Hinblick auf den Beginn der Überholvorgänge zwischen den Abschnitten mit bzw. ohne Fahrstreifenaddition sind die Untersuchungsabschnitte in zwei Kollektive entsprechend ihrer Ausbildung des Beginns zu unterteilen. Da für die Abschnitte mit unkritischem Wechsel am Beginn (Nr. 12 bis 15) dann keine ausreichende Datenbasis vorliegt (vgl. Ziffer 9), um verlässliche Aussagen zu erhalten, wird sich auf die Analyse der Abschnitte mit Fahrstreifenaddition (Nr. 1 bis 11) beschränkt.

Im Hinblick auf die im Rahmen der Modellreduktion zu beachtende Multikollinearität musste festgestellt werden, dass Multikollinearitäten zwischen den betrachteten Regressoren

- Verkehrsstärke auf dem Überholabschnitt,
- SV-Anteil,
- Länge und
- Position des Überholabschnitts

bestehen.

Bei der Regression auf den Anteil der Ausscherer auf den ersten 200 m bezogen auf alle Ausscherer im Überholabschnitt zeigt sich, dass die Verkehrsstärke nicht signifikant erforderlich ist, um die Regressanden zu schätzen (P-Wert=0,900 mit $k=0$). Die drei im Modell verbliebenen Regressoren schätzen den Regressanden jedoch nur mit einem schwachen Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,212$. Dieser Ansatz wird daher verworfen und es können aus dieser Analyse keine Hinweise abgeleitet werden.

9.3.3 Ein- und Ausschervorgänge am Ende

Der Anteil der Einscherer auf den letzten 200 m vor dem Ende des Überholabschnitts bezogen auf alle Einschervorgänge lässt sich anhand der Verkehrsstärke und der Länge sowie der Position des Überholabschnitts schätzen. Im Gegensatz zum SV-Anteil zeigten sich diese drei Regressoren im Rahmen der Modellreduktion als signifikant erforderlich (P-Werte $< 0,05$). Trotz der schon mehrfach angeführten Multikollinearität in der vorliegenden Datenbasis zwischen der Position und dem SV-Anteil, kann ein Einfluss des SV-Anteils weitestgehend ausgeschlossen werden. Der SV-Anteil zeigt sich auch bei den Kombinationen ohne die Position und im Rahmen der einfachen Regression auf die Regressanden als nicht signifikant (P-Wert $> 0,1$). Gleichung 9.3 zeigt das Ergebnis der Regressionsanalyse für die Schätzung des Anteils der Einscherer am Ende bezogen auf die Gesamtheit aller Einschervorgänge.

Gleichung 9.3: $y = 0,036 x_1 - 0,038 x_3 - 1,884 x_4 + 63,026$ ($R^2 = 0,726$)

mit:

y = Anteil Einscherer am Ende bezogen auf alle Einschervorgänge	[%]
x_1 = Verkehrsstärke	[Kfz/30 Min]
x_3 = Länge des Überholabschnitts	[m]
x_4 = absolute Position des Überholabschnitts	[-]

Das Ergebnis der Regressionsanalyse zeigt, dass bei konstanter Verkehrsstärke aber länger werdendem Überholabschnitt und/oder ansteigender Position der Anteil der Einscherer am Ende an allen Einschervorgängen abnimmt. Bei konstanter Länge und Position nimmt der Anteil der Einscherer am Ende mit zunehmender Verkehrsstärke ebenfalls zu. Die Effekte erscheinen logisch und plausibel.

Unter der Annahme, dass ab einem gewissen Anteil von Einscherern am Ende vermehrt kritische Fahrstreifenwechsel stattfinden, liefert Gleichung 9.3 nach der Länge aufgelöst einen Ansatz zur Bestimmung einer aus Sicherheitsüberlegungen abgeleiteten minimal erforderlichen Länge. Gleichung 9.4 zeigt, dass sich die minimale Länge von einem zum nachfolgenden Abschnitt um jeweils 50 m verringert. 100 Kfz mehr in 30 Minuten erfordern eine um 100 m längere minimale Abschnittslänge.

Gleichung 9.4: $y = 0,924 x_1 - 48,936 x_4 - 25,978 x_8 + 1.637,285$

mit:

y = aus Sicherheitsüberlegungen minimale Länge des Überholabschnitts	[m]
x_1 = Verkehrsstärke	[Kfz/30 Min]
x_4 = absolute Position des Überholabschnitts	[-]
x_8 = Anteil Einscherer am Ende bezogen auf alle Einschervorgänge	[%]

In einem weiteren Analyseschritt wurde der Frage nachgegangen, ob ab einer gewissen Abschnittslänge der Anteil der Einscherer am Ende an allen Einschervorgängen wieder zunimmt, da aufgrund der Länge dann eine neue „Welle“ von Überholvorgängen eintritt. Dafür wurde nur der einfache Zusammenhang zwischen dem Anteil der Einscherer und der Länge betrachtet. Bild 9.4 zeigt als Ergebnis der Regressionsanalyse den signifikanten und guten Zusammenhang zwischen den beiden Größen.

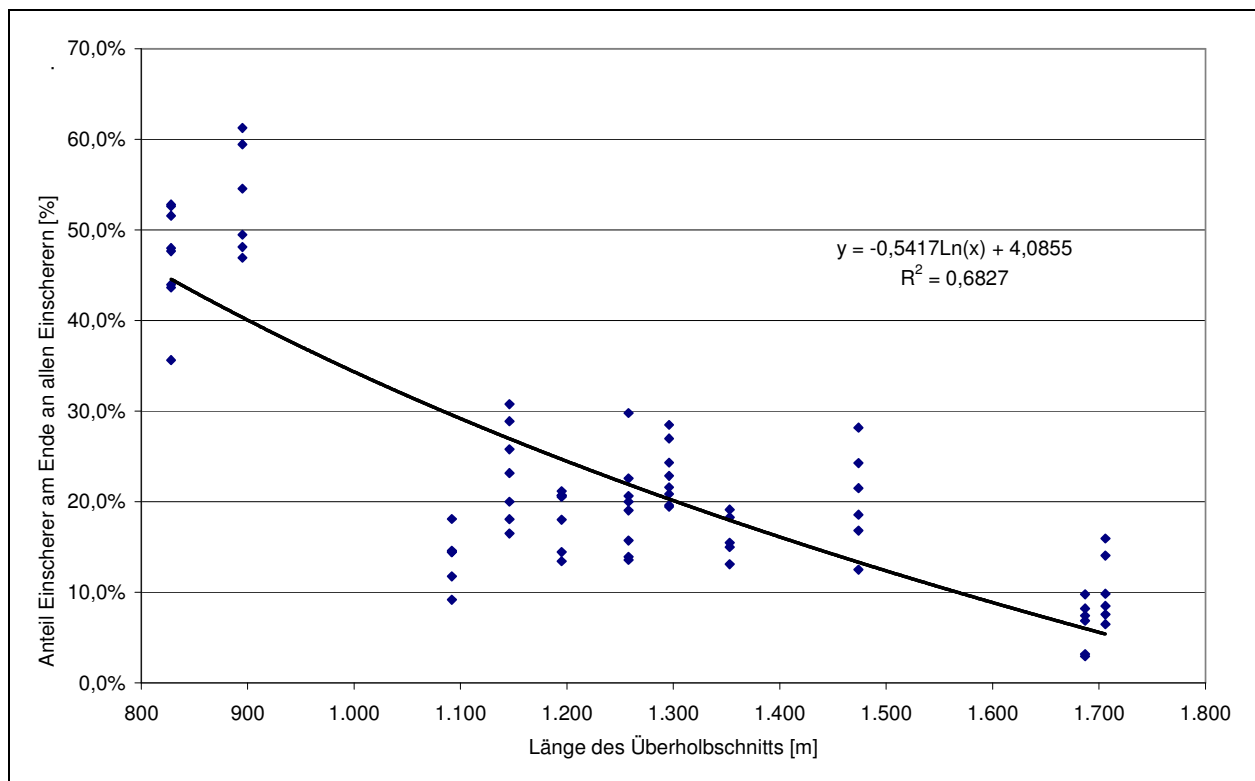


Bild 9.4: Zusammenhang zwischen der Länge der Überholabschnitte und dem Anteil der Einscherer am Ende (n=73)

Es wird deutlich, dass eine kontinuierliche Abnahme des Anteils mit zunehmender Länge einhergeht und somit nicht von einer Zunahme des Anteils der Einschervorgänge ab einer gewissen Länge auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Daten ausgegangen werden kann. Da es höchst unwahrscheinlich ist, dass ab einer gewissen Länge keine Einschervorgänge mehr auf den letzten 200 m stattfinden¹⁶, beschreibt ein logarithmisches Modell den Zusammenhang am besten.

Auf den letzten 200 m eines Überholabschnitts finden Ausschervorgänge nur selten statt. Maximal 4 % aller Ausschervorgänge wurden in diesem Bereich bei kurzen Untersuchungsabschnitten (< 900 m) beobachtet. Bei längeren Untersuchungsabschnitten beträgt der Anteil maximal 2 %, i.d.R. unter 1 %. Ausschervorgänge nach dem Ende des Überholabschnitts, d.h. bereits auf der Sperrfläche, wurden nicht beobachtet.

9.3.4 Sperrflächenüberfahrten am Ende

Bei der Analyse der Sperrflächenüberfahrten werden folgende unabhängige Variablen im Rahmen der Regressionsanalysen betrachtet:

- die Anzahl der Sperrflächenüberfahrten pro Zeitintervall
- der Anteil der Sperrflächenüberfahrten an allen Einschervorgängen
- der Anteil der Sperrflächenüberfahrten an den Einschervorgängen auf den letzten 200 m

Von besonderem Interesse bei den Betrachtungen zu den Sperrflächenüberfahrten am Ende ist die vermutete Abhängigkeit von der Abschnittslänge. Besteht eine solche Abhängigkeit lassen sich daraus ggf. Hinweise auf eine minimale erforderliche Länge von Überholabschnitten ableiten. Aus dieser Überlegung heraus werden im Rahmen der Modellreduktionen nur solche Kombinationen analysiert, die die Länge als potentiellen Regressor enthalten. Als weitere mögliche Einflüsse werden (wie auch bei den übrigen Analysen zu den Ein- und Ausschervorgängen) die Position, die Verkehrsstärke und der SV-Anteil in Betracht gezogen.

Für die Regressionen auf die Anzahl der Sperrflächenüberfahrten pro Zeitintervall muss festgestellt werden, dass sich zwar die Position, die Verkehrsstärke und die Länge in manchen Kombinationen als signifikant zeigten ($\alpha=0,05$), die jeweiligen Schätzfunktionen die Anzahl der Sperrflächenüberfahrten jedoch nur mit einem schwachen, teilweise äußerst schwachen Bestimmtheitsmaß erklären ($R^2 \ll 0,5$). Im betrachteten Spektrum dieser Untersuchung (z.B. $828 \text{ m} \leq L \leq 1.706 \text{ m}$) ergeben sich anhand der Modellberechnungen denn auch nur Sperrflächenüberfahrten von weniger als 1 pro 30 Minuten. Hinzu kommt, dass bei einigen Modellen sich der Einfluss der Länge negativ auf die Sperrflächenüberfahrten zeigt. Negativ bedeutet hierbei, dass mit zunehmender Länge die Anzahl der Sperrflächenüberfahrten ebenfalls zunimmt. Im Hinblick auf die Einflussfaktoren auf die Anzahl der Sperrflächenüberfahrten gilt es zu beachten, dass aufgrund der bestehenden Multikollinearität zwischen der Position und dem SV-Anteil ein Einfluss des SV-Anteils nicht ausgeschlossen werden kann.

Auch bei den Regressionen auf den Anteil der Sperrflächenüberfahrten an allen Einschervorgängen zeigten sich denn auch nicht nur Einflüsse aus der Position und Länge des Überholabschnitts sowie der Verkehrsstärke, sondern auch des SV-Anteils. Bei den Regressionen auf den Anteil der Sperrflächenüberfahrten an den Einschervorgängen am Ende konnten im Rahmen der Modellreduktionen lediglich Einflüsse aus der Position und Länge des Überholabschnitts als signifikant ($\alpha=0,05$) ermittelt werden. Dabei zeigte sich bei allen Modellen ein unplausibler, da

¹⁶ Dieser Effekt würde sich durch ein lineares Modell ergeben.

negativer Einfluss der Länge. Dieser negative Einfluss zeigte sich auch teilweise bei den Regressionen auf den Anteil der Sperrflächenüberfahrten an allen Einschervorgängen. Da alle ermittelten Schätzfunktionen stets ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 < 0,5$ aufweisen, muss insgesamt festgehalten werden, dass sich die Gegenüberstellungen der Sperrflächenüberfahrten mit den dem Verkehrsplaner zur Verfügung stehenden Regressoren als nicht zielführend darstellen. Aufgrund der voranstehenden Ergebnisse besitzen die nachfolgenden Ausführungen lediglich deskriptiven Charakter:

- Sperrflächenüberfahrten am Ende der Untersuchungsabschnitte konnten nur relativ selten beobachtet werden. In den zur Analyse der Sperrflächenüberfahrten zur Verfügung stehenden 24,5 h (entspricht 49 30 Min-Intervallen) traten während 14 h überhaupt keine Sperrflächenüberfahrten auf.
- In 35 der 49 Betrachtungsintervalle wurden weniger als vier Sperrflächenüberfahrten in 30 Minuten gezählt.
- In lediglich vier Intervallen wurden mehr als acht Sperrflächenüberfahrten in 30 Minuten registriert.
- Unterhalb einer Verkehrsstärke von etwa 325 Kfz/30 Min bzw. 650 Kfz/h konnten keine Intervalle beobachtet werden, in denen mehr als drei Sperrflächenüberfahrten pro 30 Minuten zu verzeichnen waren.
- Im Gegensatz zu JÄHRIG (2006) (vgl. Ziffer 2.4) konnte ein einfacher Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der Anzahl der Sperrflächenüberfahrten nicht nachgewiesen werden. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass die Analysen von JÄHRIG auf einem sehr kurzen ($L=550$ m) Überholabschnitt mit dem RQ 11,5+ gründen.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden dann die Kenngrößen der Pulkbildung (vgl. Ziffer 4.5) den oben aufgeführten Kenngrößen der Sperrflächenüberfahrten gegenübergestellt. Jedoch waren auch diese Analysen nicht zielführend.

Es ist nahe liegend, dass zwischen den oben aufgeführten Kenngrößen der Sperrflächenüberfahrten und der Anzahl der Einscherer, der Einscherer am Ende bzw. dem Anteil der Einscherer am Ende an allen Einschervorgängen ein Zusammenhang besteht. Dieser zeigt sich dann auch i.d.R. als hochsignifikant ($\alpha=0,05$) bei den durchgeführten Regressionsanalysen. Jedoch beschreiben die dabei ermittelten Schätzfunktionen die Zusammenhänge lediglich schwach ($R^2 < 0,3$).

Bild 9.5 zeigt die Gegenüberstellung der Anzahl der Sperrflächenüberfahrten mit dem Anteil der Einscherer am Ende an allen Einschervorgängen. Es lässt sich erkennen, dass zwar insbesondere bei den sehr hohen Anteilen der Einscherer am Ende auch vergleichsweise häufig Sperrflächenüberfahrten beobachtet werden mussten, dies jedoch auch schon vereinzelt bei geringen Anteilen auftritt.

Das 0,85-Quantil der Anzahl der Sperrflächenüberfahrten beträgt 5 pro 30 Minuten. Betrachtet man lediglich die Untersuchungsintervalle, bei denen 5 oder mehr Sperrflächenüberfahrten auftraten, erkennt man, dass es sich hierbei um i.d.R. Untersuchungsintervalle der Abschnitte 7, 10 und 11 handelt. Mit Hinweis auf Tabelle 3.1 und Tabelle 7.1 kann somit festgehalten werden, dass mit einer vergleichsweise hohen Anzahl von Sperrflächenüberfahrten i.d.R. dann gerechnet werden muss, wenn die Länge des Überholabschnitts kleiner 900 m beträgt. Bei gleichzeitig hoher Belastung und vergleichsweise hohem SV-Anteil (Nr. 11: 28,4 % SV im Einfahrstrom, 14,4 % im Überholabschnitt) können vergleichsweise viele Sperrflächenüberfahrten auch bereits bei längeren Überholabschnitten auftreten.

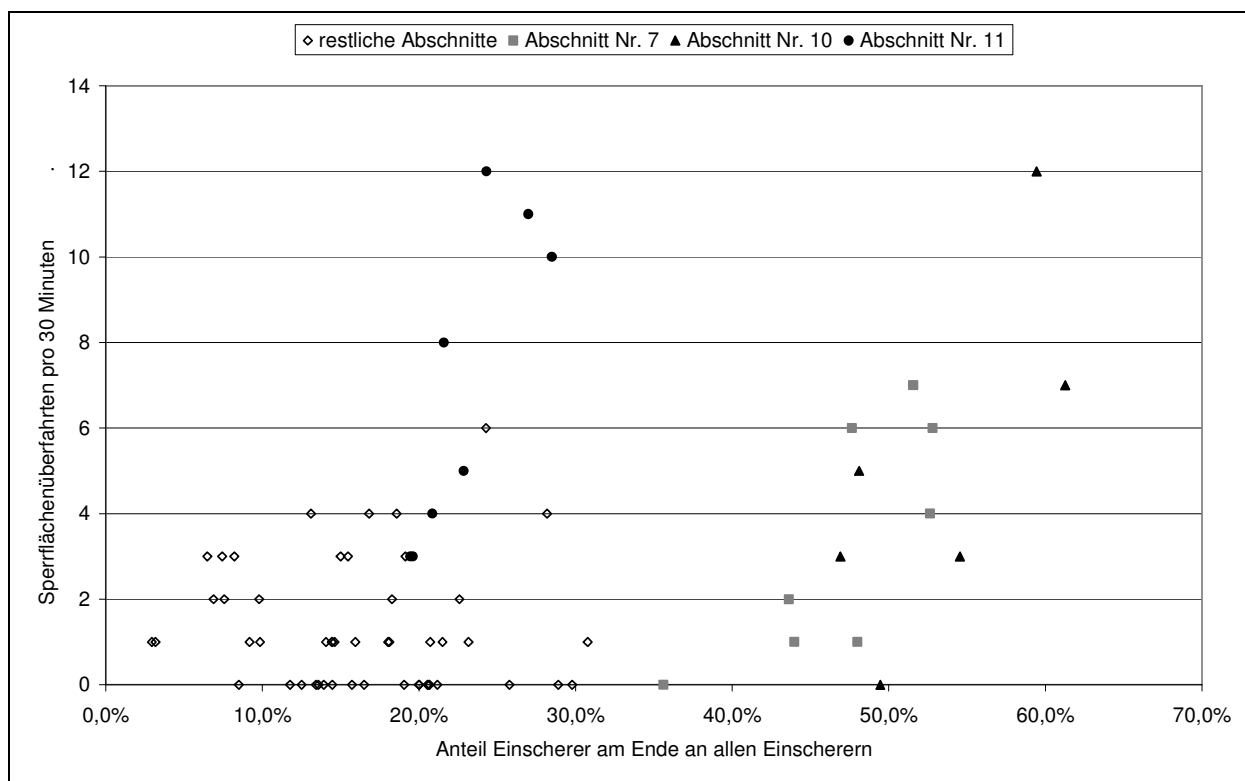


Bild 9.5: Gegenüberstellung der Anzahl der Sperrflächenüberfahrten mit dem Anteil der Einscherer am Ende an allen Einschervorgängen (n=73)

9.4 Verkehrssituationsanalyse

Eine Verkehrssituationsanalyse, bei der eine Bewertung des Konfliktpotenzials der Ein- und Ausschervorgänge auf den letzten 200 m vor dem Ende ausgewählter Überholabschnitte (inkl. der Sperrflächenüberfahrten) vorgenommen wurde, soll Erkenntnisse im Hinblick auf eine minimale Länge von zweistreifigen Überholabschnitten aus Gründen der Verkehrssicherheit liefern. Die Grundlage für die nachfolgenden Analysen bildet die Arbeit von LIESKE und WENKER (2005) (vgl. Ziffer 6.7).

In Tabelle 9.2 erfolgt eine Gegenüberstellung der verkehrlichen Kenngrößen mit den Ergebnissen der Verkehrssituationsanalyse. Neben der Anzahl der beobachteten Konflikte je Konfliktstufe (KS) ist auch die Summe aller Konflikte sowie eine gewichtete Summe aller Konflikte aufgeführt. Die Gewichtung KS I zu KS II zu KS III erfolgte dabei im Verhältnis 0,5 : 1 : 2, um den schweren Konflikten der KS III besonderes Gewicht zu verleihen. Da zwischen den beiden gewählten Kenngrößen der Verkehrssituationsanalyse erwartungsgemäß ein hochsignifikanter und enger Zusammenhang besteht, werden im Folgenden lediglich Regressionen auf die Kenngröße gewichtete Summe aller Konflikte durchgeführt.

Da die Verkehrssituationsanalyse nur an drei ausgewählten Überholabschnitten durchgeführt wurde, liegt ein relativ eingeschränktes Spektrum der Streckencharakteristika Position und Länge der Überholabschnitte vor (vgl. Tabelle 9.2). Somit ist es wenig zielführend diese Parameter als mögliche Regressoren bei den im Folgenden durchzuführenden Analysen zu berücksichtigen. Es zeigt sich jedoch deutlich, dass beim Untersuchungsabschnitt Nr. 9 mit 1.195 m Länge weniger (gewichtete) Konflikte zu verzeichnen waren als bei den beiden anderen mit Längen unterhalb von 900 m. Bei der einfachen Regression mittels der Verkehrsstärke zeigt sich diese als signifikant ($\alpha=0,05$), um die Anzahl der (gewichteten) Konflikte zu schätzen. In Bild 9.6 ist

der tendenzielle, jedoch zu erwartende Anstieg der (gewichteten) Konflikte bei steigender Verkehrsstärke zu erkennen. Da zwischen der Verkehrsstärke und dem SV-Anteil in den ausgewählten Intervallen dieser (Teil-) Datenbasis ein signifikanter Zusammenhang in der Form besteht, dass bei den höher belasteten Untersuchungsintervallen ein geringerer SV-Anteil vorliegt als bei den schwächer belasteten Intervallen, liegt also Multikollinearität vor und es kann ein Einfluss des Schwerverkehrs nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund des eingeschränkten Längenspektrums, des geringen Bestimmtheitsmaßes der Regression mittels der Verkehrsstärke ($R^2 < 0,2$) sowie der vorhandenen Multikollinearität müssen diese Analysen als nicht zielführend eingestuft werden.

Untersuchungsabschnitt (Position)	Intervall	Länge [m]	q [Kfz/30 Min]	SV- Anteil [%]	KS I	KS II	KS III	Summe Konflikte	KS II+III	Summe Konflikte (gewichtet)
Nr. 7 (Pos. 3)	14:55-15:25	828	460	4,8	21	31	4	56	35	49,5
	15:25-15:55		478	6,7	36	32	3	71	35	56,0
	15:55-16:25		593	5,2	41	43	4	88	47	71,5
	16:25-16:55		632	3,8	37	41	2	80	43	63,5
	16:55-17:25		661	3,3	28	33	1	62	34	49,0
	17:25-17:55		544	3,1	26	34	0	60	34	47,0
	17:55-18:25		496	2,2	24	26	0	50	26	38,0
	18:25-18:55		473	2,1	22	33	1	56	34	46,0
Nr. 9 (Pos. 3)	06:50-07:20	1.195	431	6,7	11	22	1	34	23	29,5
	07:20-07:50		648	5,2	20	17	0	37	17	27,0
	07:50-08:20		455	7,3	19	8	0	27	8	17,5
	08:20-08:50		398	9,5	14	13	1	28	14	22,0
	08:50-09:20		333	11,1	17	14	0	31	14	22,5
	09:20-09:50		322	12,4	13	8	0	21	8	14,5
	09:50-10:20		292	14,4	13	9	0	22	9	15,5
Nr. 10 (Pos. 1)	14:45-15:15	895	370	15,7	33	22	3	58	25	44,5
	15:15-15:45		421	15,9	34	23	1	58	24	42,0
	15:45-16:15		438	14,2	46	20	2	68	22	47,0
	16:15-16:45		492	9,1	31	20	3	54	23	41,5
	16:45-17:15		410	8,0	24	29	1	54	30	43,0
	17:15-17:45		441	9,1	40	27	2	69	29	51,0
	17:45-18:15		458	9,4	27	27	4	58	31	48,5
	18:15-18:45		364	8,8	21	21	3	45	24	37,5

Tabelle 9.2: Gegenüberstellung der verkehrlichen Kenngrößen mit den Ergebnissen der Verkehrssituationsanalyse

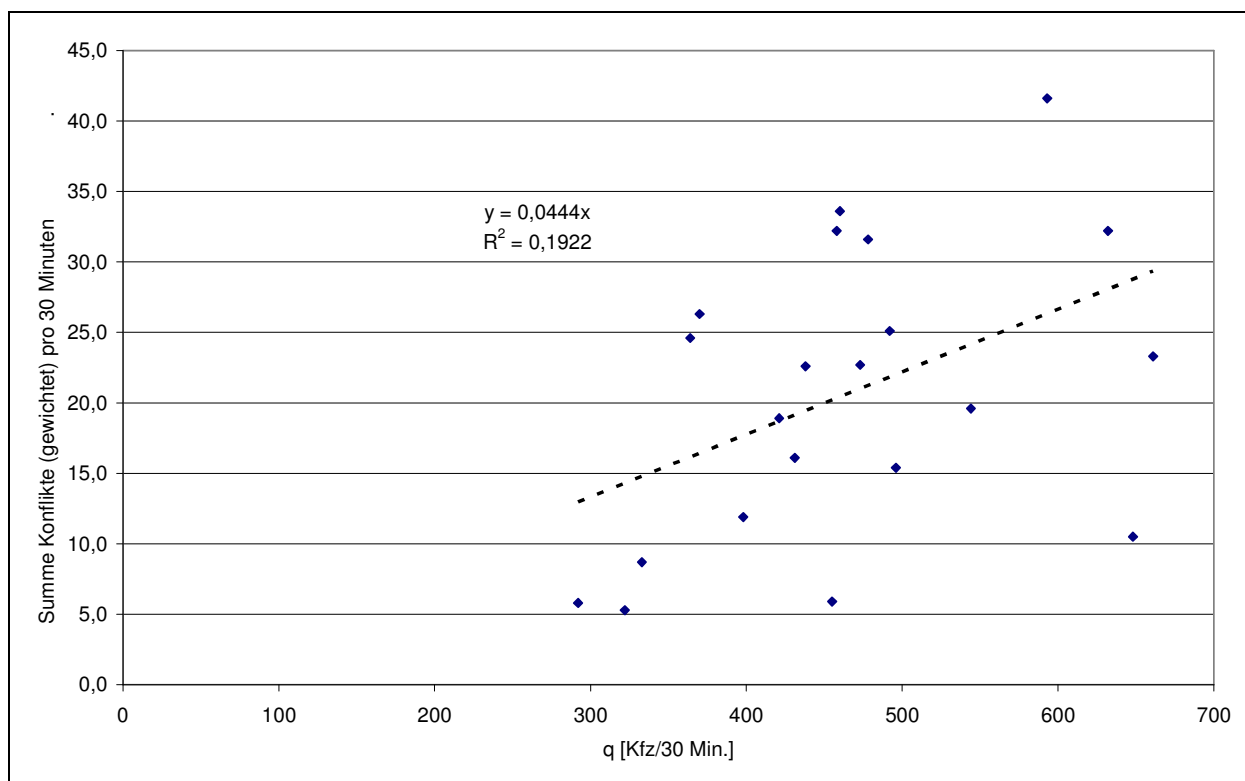


Bild 9.6: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der gewichteten Summe aller Konflikte (n=21)

Um dennoch Hinweise aus der Verkehrssituationsanalyse im Hinblick auf sicherheitsrelevante Merkmale ableiten zu können, wurde der Einfluss ausgewählter Kenngrößen des Überholverhaltens (Anzahl Überholvorgänge, vgl. Ziffer 9.2 sowie Anteil der Einscherer am Ende an allen Einschervorgängen, vgl. Ziffer 9.3.3) auf die Verkehrssicherheit analysiert. Um den identifizierten (und logischen) Zusammenhang mit der Verkehrsstärke zu berücksichtigen, wurden dabei Regressionen auf die Anzahl der (gewichteten) Konflikte pro Kraftfahrzeug durchgeführt.

Während sich die Anzahl der Überholvorgänge als nicht signifikant zeigte, um die Anzahl der (gewichteten) Konflikte pro Kraftfahrzeug zu schätzen, ergab die Regression mit dem Anteil der Einscherer am Ende einen hochsignifikanten und relativ guten Zusammenhang. Bild 9.7 macht deutlich, dass mit einem zunehmenden Anteil von Einschervorgängen auf den letzten 200 m (bezogen auf die Gesamtzahl aller Einschervorgänge) erwartungsgemäß auch die Anzahl der (gewichteten) Konflikte pro Kraftfahrzeug ansteigt. Bild 9.7 zeigt jedoch auch, dass Anteile zwischen etwa 20 % und 45 % in der Datenbasis nahezu fehlen. In diesem Bereich zeigt die ermittelte Schätzfunktion eine Verdopplung der (gewichteten) Konflikte pro Kraftfahrzeug. Unter Festlegung eines noch als zu akzeptierend angesehenen Maßes für die Anzahl der (gewichteten) Konflikte, ergibt sich anhand von Bild 9.7 der Anteil von Einscheren am Ende an allen Einschervorgängen der aus sicherheitsrelevanten Kriterien als kritisch einzustufen ist. In Kombination mit den Ergebnissen aus Ziffer 9.3.3 lässt sich mit einer solchen Festlegung anhand von Gleichung 9.4 in Abhängigkeit von der Position und der Verkehrsstärke eine aus Sicherheitsüberlegungen heraus abgeleitete minimale Länge von Überholabschnitten angeben.

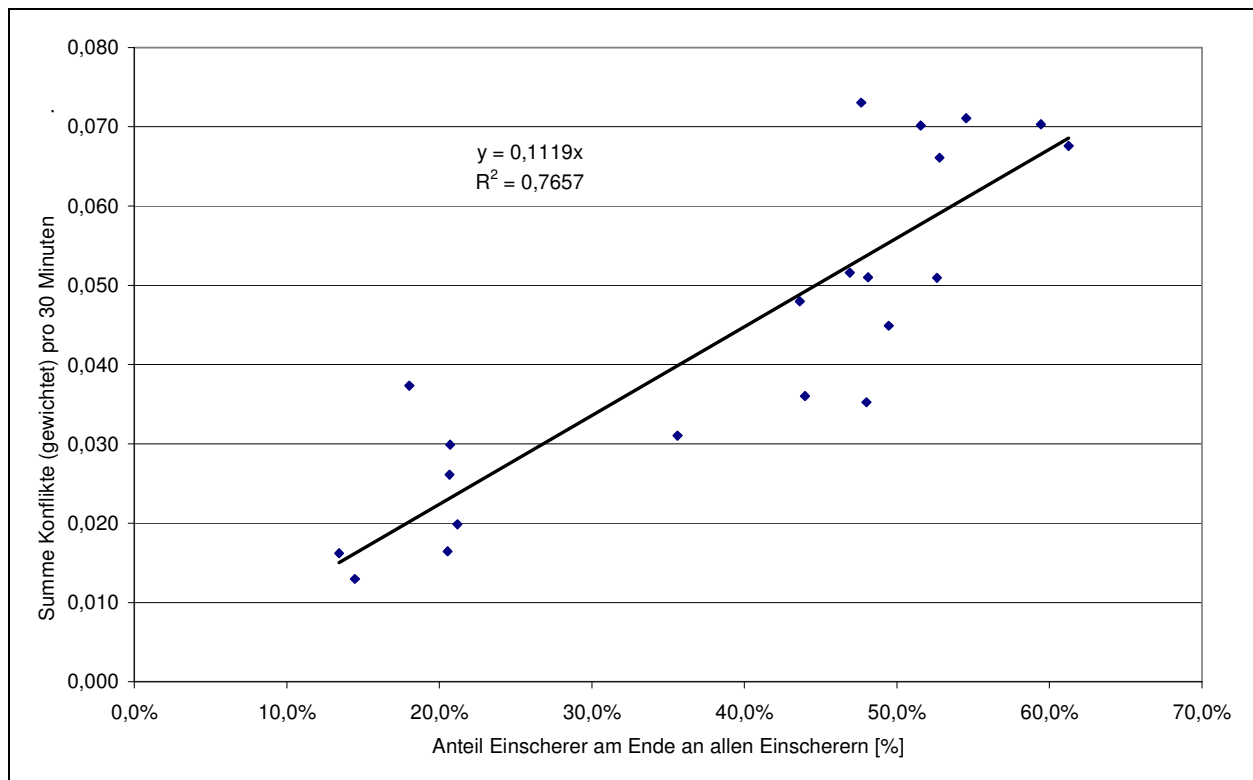


Bild 9.7: Zusammenhang zwischen dem Anteil der Einscherer am Ende an allen Einschervorgängen und der gewichteten Summe aller Konflikte (n=21)

Im Hinblick auf eine maximale Länge von Überholabschnitten wurden auch die Zusammenhänge zwischen der Anzahl der (gewichteten) Konflikte pro Kraftfahrzeug und den Kenngrößen der Pulkbildung (vgl. Ziffer 10) analysiert. Diese Betrachtungen bleiben jedoch ergebnislos und es wird daher an dieser Stelle auf weitere Ausführungen verzichtet.

9.5 Zusammenfassung der Analysen zum Überholverhalten

Die qualitative Analyse der **Verteilung der Ein- und Ausschervorgänge über die gesamte Länge** konnte keine Auffälligkeiten aufdecken.

Anhand der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge der Überholabschnitte lässt sich die Anzahl der **Überholvorgänge** auf Überholabschnitten schätzen, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen.

Da kein Modell für die Abschnitte, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, entwickelt werden konnte und auch der einfache Zusammenhang zwischen der Ausbildung des Beginns und der Anzahl der Überholvorgänge nur äußerst schwach ausgeprägt ist, kann aus diesen Ergebnissen keine Prognose der Anzahl der Überholvorgänge für diese Abschnitte vorgenommen oder abgeleitet werden.

- Überholabschnitte, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen

- Ein Einschervorgang (nach einem Überholvorgang) vor dem eigentlichen Beginn der Überholabschnitte mit Fahrstreifenaddition wurde nicht beobachtet. Jedoch scherten Fahrzeuge aus dem Einfahrstrom unter verschiedenen Randbedingungen bereits im Bereich der durchgezogenen Fahrstreifenbegrenzung aus (Länge, Stärke Einfahrstrom mit SV-Anteil im Einfahrstrom).

- Das Einscheren (nach einem Überholvorgang) bis zu 100 m nach dem Beginn bei Untersuchungsabschnitten mit Fahrstreifenaddition ist ein seltenes Ereignis.

- **Überholabschnitte, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen**

- Ausschervorgänge vor dem eigentlichen Beginn der Überholabschnitte wurden auf allen Untersuchungsabschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen beobachtet.
- Bei Abschnitten, die mit einer unkritischen Wechsel beginnen, muss dem Einschervorgang ein Ausscheren vorangegangen sein. Einzig Untersuchungsabschnitt 12 ist dahingehend auffällig, dass hier verhältnismäßig viele Fahrzeuge bereits wieder zwischen den Stationen 100 m und 200 m Einscheren. Mit in der Spitze über 1.100 Kfz/h und Richtung ist dieser Überholabschnitt der am stärksten belastete der Abschnitte mit unkritischem Wechsel. Gleichzeitig ist er aber auch mit einer Länge von nur 929 m der kürzeste Überholabschnitt dieses Kollektivs.

Der **Anteil der Ausscherer auf den ersten 200 m** bezogen auf alle Ausscherer im Überholabschnitt lässt sich nur mit einem schwachen Bestimmtheitsmaß schätzen. Als Einflussfaktoren konnten jedoch der SV-Anteil, die Länge und die (absolute) Position der Abschnitte herausgearbeitet werden. Ein Einfluss der Verkehrsstärke zeigte sich aufgrund bestehender Multikollinearität hingegen nicht.

Der **Anteil der Einscherer auf den letzten 200 m** vor dem Ende des Überholabschnitts bezogen auf alle Einschervorgänge lässt sich anhand der Verkehrsstärke und der Länge sowie der Position des Überholabschnitts schätzen. Im Gegensatz zum SV-Anteil zeigten sich diese drei Regressoren im Rahmen der Modellreduktion als signifikant erforderlich. Trotz der schon mehrfach angeführten Multikollinearität in der vorliegenden Datenbasis zwischen der Position und dem SV-Anteil, kann ein Einfluss des SV-Anteils weitestgehend ausgeschlossen werden. Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Daten kann nicht von einer Zunahme des Anteils der Einschervorgänge ab einer gewissen Länge ausgegangen werden.

Ausschervorgänge auf den letzten 200 m eines Überholabschnitts finden nur selten statt.

Ein Modell zur Schätzung der **Sperrflächenüberfahrten** konnte nicht gebildet werden. Es kann jedoch festgehalten werden, dass Sperrflächenüberfahrten am Ende der Untersuchungsabschnitte nur relativ selten beobachtet werden mussten.

Mit einer vergleichsweise hohen Anzahl von Sperrflächenüberfahrten muss i.d.R. dann gerechnet werden, wenn die Länge des Überholabschnitts kleiner 900 m beträgt. Bei gleichzeitig hoher Belastung und vergleichsweise hohem SV-Anteil können vergleichsweise viele Sperrflächenüberfahrten auch bereits bei längeren Überholabschnitten auftreten.

Im Rahmen der **Verkehrssituationsanalyse** zeigte sich mit dem Anteil der Einscherer am Ende an allen Einschervorgängen und der gewichteten Summe der Konflikte ein hochsignifikanter und relativ guter Zusammenhang. Mittels einer Festlegung des Anteils von Einscheren am Ende an allen Einschervorgängen, der aus sicherheitsrelevanten Kriterien als kritisch einzustufen ist, kann in Kombination mit den Ergebnissen zu den Einschervorgängen am Ende in Abhängigkeit von der Position und der Verkehrsstärke eine aus Sicherheitsüberlegungen heraus abgeleitete minimale Länge von Überholabschnitten ermittelt werden.

10 Pulkbildung

Im Hinblick auf die Pulkbildung werden

- die Anzahl der Pulks,
- die Fahrzeuge in Pulks,
- der Pulkanteil sowie
- die Pulklänge

im Folgenden analysiert und die relevanten Ergebnisse dargestellt. Dabei werden zu berücksichtigende Besonderheiten und evtl. vorhandene Einflüsse aufgezeigt.

10.1 Allgemeines

Vor der Einfahrt in die 15 Überholabschnitte wurden im gesamten Auswertezeitraum 3.163 Pulks erfasst. Der zeitliche Umfang, der dabei zur Analyse herangezogen wurde, beträgt 55,5 Stunden (= 111 Beobachtungsintervalle á 30 Min). Daraus resultiert, dass im Mittel etwa ein Pulk pro Minute auftrat und beobachtet werden konnte.

Wie Tabelle 10.1 zeigt, variiert die **Anzahl der Pulks** nicht nur aufgrund der unterschiedlichen Auswertezeiträume. So reicht beispielsweise das Spektrum bei den Untersuchungsabschnitten mit je vier Stunden Auswertezeitraum von 78 (Nr. 2) bis zu 348 (Nr. 15) Pulks. Die meisten Pulks traten am Untersuchungsabschnitt 12 mit 355 Pulks in 3,5 Stunden auf.

Untersuchungsabschnitt	Auswertezeitraum	Position	L _{Vorlauf}	Anzahl Pulks
	[h]	[-]	[m]	[-]
1	3,0	1	2.200	74
2	4,0	2	1.500	78
3	2,0	2	1.100	61
4	4,0	1	2.000	107
5	4,0	2	1.400	136
6	4,0	1	500	147
7	4,0	3	1.800	343
8	4,0	1	3.500	179
9	3,5	3	1.400	246
10	4,0	1	2.600	312
11	4,0	1	1.200	256
12	3,5	2	1.200	355
13	3,5	4	1.400	283
14	4,0	1	1.500	238
15	4,0	2	1.600	348

Tabelle 10.1: Anzahl der Pulks

Auf den 15 Untersuchungsabschnitten befanden sich von den 30.460 im gesamten Auswertezeitraum erfassten Fahrzeugen 8.353 Fahrzeuge in einem Pulk. Dabei umfasste die **Anzahl der gepulkten Fahrzeuge** in den 111 30 Minutenintervallen ein Spektrum zwischen 8 und 202 Fahrzeugen.

Der mittlere **Pulkanteil** betrug somit etwa 27 %. Der Pulkanteil variiert dabei zwischen ca. 3 % und 53 % pro 30-Min-Intervall.

Die **Pulklänge** ist neben der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Pulkführer und den überholenden Fahrzeugen die maßgebende Einflussgröße im Bezug auf die Pulkauflösung (ROOS, 1989). Je länger ein Pulk ist, desto länger wird bei gleicher Geschwindigkeitsdifferenz auch der benötigte Weg zur Pulkauflösung.

Der längste Pulk, der beobachtet werden konnte, hatte eine Länge von 20 Fahrzeugen und trat an Untersuchungsabschnitt 11 auf. 99 % aller 3.163 beobachteten Pulks waren allerdings nicht länger als 10 Fahrzeuge, 85 % nicht länger als 4 und über 60 % nicht länger als 2 Fahrzeuge. Bild 10.1 zeigt die Häufigkeitsverteilung. Dieses Ergebnis deckt sich in etwa mit den Untersuchungen von BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) (vgl. Ziffer 2.5.3). Auch bei ihren Beobachtungen traten nur wenige Pulks mit einer Länge von über 3 Fahrzeugen auf, jedoch gilt es dabei die unterschiedlichen Pulkdefinitionen zu berücksichtigen (vgl. u.a. Ziffer 4.5)

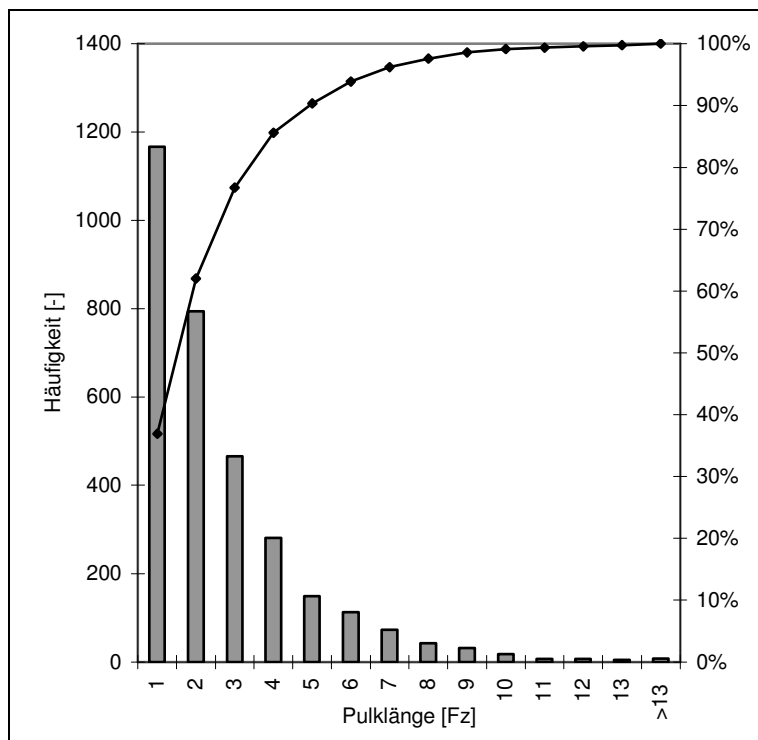


Bild 10.1: Häufigkeitsverteilung der beobachteten Pulklänge (n=3.163)

Um eine Überdimensionierung der Überholabschnitte auszuschließen, wurde analog zu ROOS (1989) die Pulklänge bestimmt, die von 85 % aller innerhalb eines Zeitintervalls beobachteten Pulks nicht überschritten wurde. Die pro 30-Min-Intervall gebildeten 0,85-Quantile der Pulklänge nehmen Werte zwischen 2 und 13 Fahrzeugen an (vgl. Bild 10.2). Es wird deutlich, dass in 99 % aller Beobachtungsintervalle die 85 %-ige Pulklänge nicht mehr als 9 und in 95 % nicht mehr als 7 Fahrzeuge betrug. Das Maximum von 13 Fahrzeugen und auch die beiden Intervalle mit 9 Fahrzeugen stammen vom Untersuchungsabschnitt 8. Unter Berücksichtigung der dort vorliegenden Besonderheiten der Vorlaufstrecke (Mehrzweckstreifen, vgl. Ziffer 8.1) kann festgehalten werden, dass auf den übrigen 14 Untersuchungsabschnitten die max. 85 %-ige Pulklänge 7 Fahrzeuge beträgt.

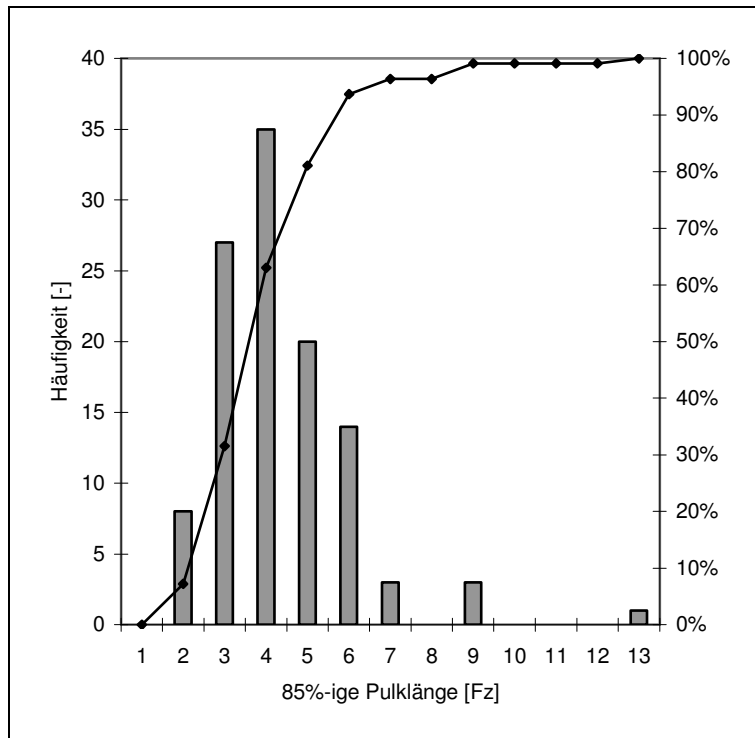


Bild 10.2: Häufigkeitsverteilung der ermittelten 85 %-igen Pulklänge (n=111)

Fazit

Die Betrachtung aller beobachteten Pulklängen hat gezeigt, dass unabhängig von allen Einflüssen 99 % aller Pulks nicht länger als 10 Fahrzeuge waren. Bezogen auf ein 30-Min-Intervall kann i.d.R. von einer maximalen 85 %-igen Pulklänge von 7 Fahrzeugen ausgegangen werden.

10.2 Einflüsse auf die Pulkbildung

Wie unter Ziffer 6.8 und auch bei der Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens auf der Vorlaufstrecke (vgl. Ziffer 8.4) beschrieben, unterscheiden sich Vorlaufstrecken zu Untersuchungsabschnitten, die sich an Pos. 1 befinden, und Vorlaufstrecken, die sich nicht an Pos. 1 befinden. Da dies auch Konsequenzen für die Pulkbildung bedeutet, müssen diese beiden Kollektive separat betrachtet werden („geteilte Stichprobe“).

Aus der Literatur (u.a. ROOS, 1989) ist bekannt, dass

- die Verkehrsstärke und
- der SV-Anteil auf der Vorlaufstrecke sowie
- die Vorlaufstreckenlänge die Pulkbildung beeinflussen.

Weiterhin haben sich in der Literatur Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten aus der

- absoluten Position der Vorlaufstrecken

gezeigt (vgl. BRANNOLTE, BASELAU und DONG, 2004), die sich evtl. auch auf die Pulkbildung auswirken. Daher werden in den folgenden Abschnitten diese Kenngrößen als Regressoren den Beschreibungsgrößen der Pulkbildung (Regressanden) gegenübergestellt.

10.3 Pulkbildung auf Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken

10.3.1 Allgemeines

Vorlaufstrecken zu Untersuchungsabschnitten, die sich an Pos. 1 befinden, weisen u.U. Besonderheiten auf, die sich nicht nur auf das Geschwindigkeitsverhalten (vgl. Ziffer 8.4), sondern auch auf die Pulkbildung auswirken. Daher werden vorab einige Anmerkungen und Besonderheiten im Hinblick auf die Analyse der Pulkbildung beschrieben:

- Wie bereits unter Ziffer 5.4 beschrieben, wird vor dem Untersuchungsabschnitt 6 (vgl. Anhang Bild A 2.7) die B 62 zusammen mit der B 3 auf je zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung geführt. Die Vorlaufstrecke zum Untersuchungsabschnitt 6 ist somit nur auf ca. 500 m einstreifig. Für die Pulkbildung bedeutet dies, dass sich aufgrund der kurzen einstreifigen Vorlaufstrecke hier auch bei höheren Verkehrsstärken wenige Pulks von relativ kurzer Länge (vgl. Bild 10.3 bzw. Bild 10.7) gebildet haben. Daraus resultiert eine verhältnismäßig geringe Anzahl von gepulkten Fahrzeugen und ein geringer Pulkanteil (vgl. Bild 10.4 bzw. Bild 10.5).
- Wie bereits unter Ziffer 8.1 aufgeführt, ist die Vorlaufstrecke zum Untersuchungsabschnitt 8 (vgl. Anhang Bild A 2.12) mit 3.500 m die längste aller im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Vorläufe. Weiterhin besitzt sie einen zweistreifigen Querschnitt mit einem beidseitig angeordneten Mehrzweckstreifen von etwa 1,8 m Breite. Beobachtungen während der Durchführung der empirischen Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Mehrzweckstreifen von vielen Fahrzeugen des Schwerverkehrs genutzt werden, um den mit höherer Geschwindigkeit nachfolgenden Fahrzeugen ein Überholen zu ermöglichen. Für die Pulkbildung bedeutet dies, dass sich auf dieser Vorlaufstrecke im Bezug auf die Anzahl der Pulks tendenziell auch hier bei höheren Verkehrsstärken wenige Pulks bilden (vgl. Bild 10.3), die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge (vgl. Bild 10.4) und damit auch der Pulkanteil (vgl. Bild 10.5) sowie vor allem die Pulkängen (vgl. Bild 10.7) jedoch teilweise deutlich über den vergleichbaren Werten der übrigen Vorlaufstrecken liegen.
- Wie unter Ziffer 8.2 beschrieben ist der Vorlauf zum Untersuchungsabschnitt 10 (vgl. Anhang Bild A 2.14) mit 2.600 m Abstand zum nächsten davor gelegenen Knotenpunkt ebenfalls sehr lang. Die Mitteltrennung mittels Schutzplanken muss auch im Hinblick auf die Pulkbildung als Besonderheit beachtet werden, da somit keine Überholmöglichkeit besteht. Diese Vorlaufstrecke entspricht von diesem, die Pulkbildung beeinflussenden Charakteristikum zwar näherungsweise einer Vorlaufstrecke, die sich innerhalb einer 2+1-Strecke befindet, jedoch erfolgt im Gegensatz zu diesen hier die Einfahrt in den einstreifigen Abschnitt nicht, nach dem bereits ein zweistreifiger Überholabschnitt durchfahren wurde. Auf dieser Vorlaufstrecke bilden sich i.d.R. die meisten Pulks (vgl. Bild 10.3). Es befinden sich jedoch auch bei höheren Verkehrsstärken nicht mehr Fahrzeuge in Pulks als bei den anderen Vorlaufstrecken bereits bei geringeren Verkehrsstärken (vgl. Bild 10.4). Demzufolge sind auch der Pulkanteil sowie die Pulkängen entgegen dem erwarteten Trend auch bei höheren Verkehrsstärken noch als „durchschnittlich“ zu bezeichnen (vgl. Bild 10.5 bzw. Bild 10.7).

Fazit

Aufgrund der besonderen Charakteristika der beiden Vorlaufstrecken zu den Untersuchungsabschnitten 6 und 8 und den daraus resultierenden Auffälligkeiten in Bezug auf die Pulkbildung, können die Ergebnisse zur Pulkbildung dieser beiden Vorlaufstrecken nicht mit denen der anderen Vorlaufstrecken zu Überholabschnitten an Pos. 1 zusammenbetrachtet werden.

Die Vorlaufstrecke zum Untersuchungsabschnitt 10 wird aufgrund der fehlenden Überholmöglichkeit ebenfalls nicht dem Kollektiv der Vorlaufstrecken, die sich an Pos. 1 befinden, zugeordnet. Eine Zuordnung zum Kollektiv der Vorlaufstrecken innerhalb einer 2+1-Strecke ist jedoch ebenso unzulässig.

Somit reduziert sich das Kollektiv der Vorlaufstrecken, die sich außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke befinden und bei denen es sich um einbahnig zweistreifige Strecken handelt, auf die Nr. 1, 4, 11 und 14.

Da die Auffälligkeiten zu den Vorlaufstrecken 6, 8 und 10 bereits oben beschrieben wurden, beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen zu den Korrelations- und Regressionsanalysen ausschließlich auf das Kollektiv der übrigen Vorlaufstrecken. Die Ergebnisse zu den Vorlaufstrecken der Abschnitte 6, 8 und 10 werden aus Gründen der Vollständigkeit i.d.R. jedoch mit dargestellt.

Bei der Analyse der Pulkbildung außerhalb von 2+1-Strecken wird anhand von Modellreduktionen überprüft, ob und welche Regressoren (vgl. Ziffer 10.2) für die Schätzung der Kenngrößen der Pulkbildung zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ notwendig sind. Da die Position der Vorlaufstrecke hierbei konstant ist, wird sie nicht in den Modellen berücksichtigt.

Im Hinblick auf die multiplen Regressionsanalysen wurde die Multikollinearität (vgl. Ziffer 6.6.4) der Einflussgrößen auf die Pulkbildung (= Regressoren = Verkehrsstärke, SV-Anteil sowie Länge der Vorlaufstrecke) auf den für die Regressionsanalysen herangezogenen Vorlaufstrecken 1, 4, 11 und 14 betrachtet. Als Ergebnis muss festgehalten werden, dass ein relativ schwacher ($R^2 = 0,368$), jedoch signifikanter (P-Wert = 0,0004) Zusammenhang zwischen der Vorlaufstreckenlänge und der Verkehrsstärke in der Art besteht, dass bei der vorliegenden Datenbasis die Verkehrsstärke bei den längeren Vorlaufstrecken geringer ist als bei den kürzeren. Diese Multikollinearität gilt es bei der Interpretation der nachfolgend erarbeiteten Ergebnisse zu beachten.

10.3.2 Anzahl Pulks

Bei der multiplen linearen Regression mit den drei Regressoren Verkehrsstärke, SV-Anteil und Länge der Vorlaufstrecke zeigt der P-Wert, dass in dieser Kombination der SV-Anteil zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ zur Erklärung der Anzahl der Pulks nicht notwendig ist und somit aus dem Modell reduziert werden kann (P-Wert = 0,552). Gleichung 10.1 zeigt das Ergebnis der zweifachen Regression mit der Verkehrsstärke und der Länge der Vorlaufstrecke.

Gleichung 10.1: $y_B = 0,063 x_1 - 0,016 x_3 + 35,971$ ($R^2 = 0,788$)

mit:

y = Anzahl der Pulks [Pulks/30 Min]
 Index B = gemäß Pulkdefinition (B) dieser Untersuchung
 x_1 = Verkehrsstärke [Kfz/30 Min]
 x_3 = Länge der Vorlaufstrecke [m]

Nach Gleichung 10.1 nimmt die Anzahl der Pulks auf den Vorlaufstrecken außerhalb der 2+1-Strecken mit ansteigender Verkehrsstärke zu. Im Gegensatz zu den Erkenntnissen aus Ziffer 10.4.2 sowie anderer Untersuchungen sinkt jedoch die Anzahl der Pulks bei länger werdender Vorlaufstrecke. Dieser Effekt ist **unplausibel** und muss mit der Multikollinearität zwischen der Vorlaufstreckenlänge und der Verkehrsstärke erklärt werden. Aufgrund des Umstands, dass die Verkehrsstärke bei den längeren Vorlaufstrecken geringer ist als bei den kürzeren tritt der in Gleichung 10.1 enthaltene Effekt auf. **Die Anzahl der Pulks auf den Vorlaufstrecken außerhalb der 2+1-Strecken lässt sich somit nicht auf Grundlage der vorliegenden Daten schätzen.**

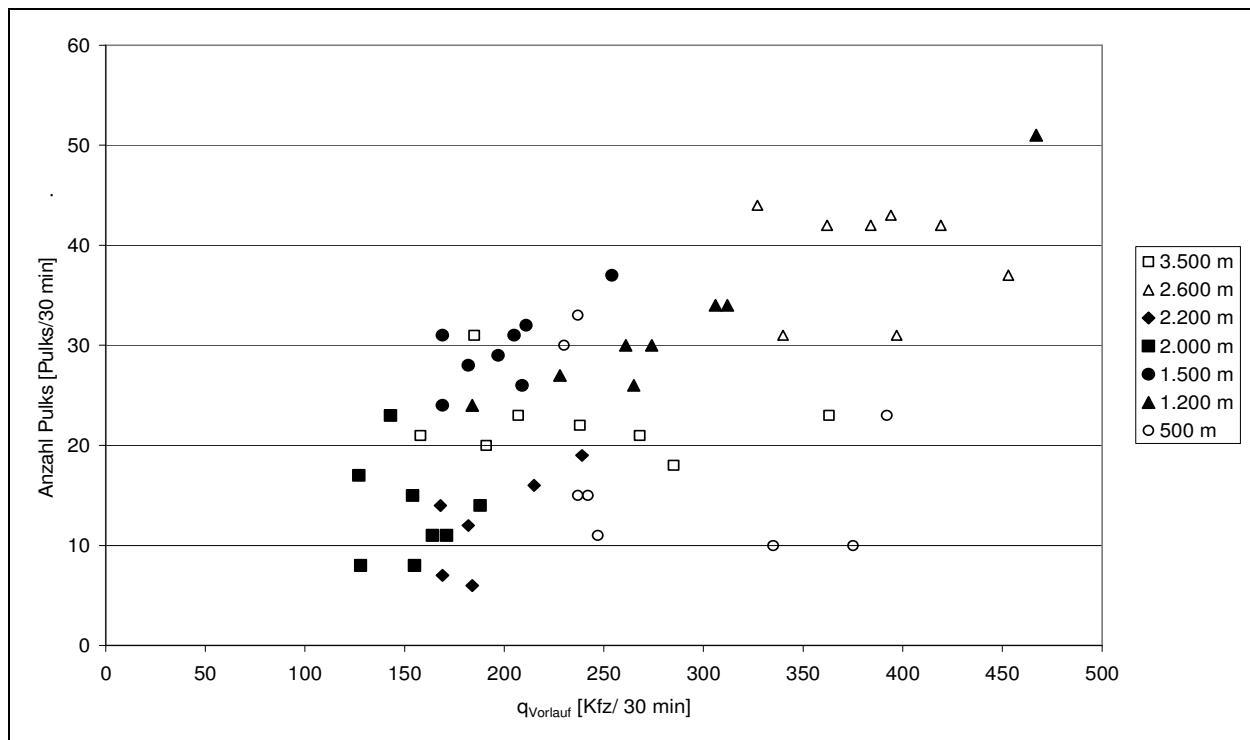


Bild 10.3: Anzahl der Pulks auf Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf der Vorlaufstrecke und deren Länge

Bild 10.3 zeigt die für die Regressionsanalysen herangezogenen Daten der Vorlaufstrecken 1 ($L_{\text{Vorlauf}} = 2.200 \text{ m}$), 4 ($L_{\text{Vorlauf}} = 2.000 \text{ m}$), 11 ($L_{\text{Vorlauf}} = 1.200 \text{ m}$) und 14 ($L_{\text{Vorlauf}} = 1.500 \text{ m}$) sowie die aufgrund ihrer Besonderheiten nur der Vollständigkeit halber dargestellten Vorlaufstrecken 6 ($L_{\text{Vorlauf}} = 500 \text{ m}$), 8 ($L_{\text{Vorlauf}} = 3.500 \text{ m}$) und 10 ($L_{\text{Vorlauf}} = 2.600 \text{ m}$).

10.3.3 Fahrzeuge in Pulks

Bei der multiplen linearen Regression mit den drei Regressoren Verkehrsstärke, SV-Anteil sowie Länge der Vorlaufstrecke zeigt der P-Wert, dass in dieser Kombination wiederum der SV-Anteil zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ zur Erklärung des Regressanden nicht notwendig ist (mit $k=0$).

Bei den zweifachen Regressionen mit der Verkehrsstärke und dem SV-Anteil bzw. der Länge der Vorlaufstrecke zeigt sich jedoch, dass jeweils der SV-Anteil bzw. die Länge in Kombination mit der Verkehrsstärke signifikant erforderlich ist, um die Anzahl der Fahrzeuge in Pulks zu schätzen.

Wie schon bei der Bestimmung der Anzahl der Pulks auf Vorlaufstrecken, die sich außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke befinden (vgl. Ziffer 10.3.2), zeigt die Vorlaufstreckenlänge auch bei der Regression auf die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge einen unplausiblen Effekt. Und auch die zweifache Regression mit der Verkehrsstärke und dem SV-Anteil zeigt nicht die erwartungsgemäße Zunahme der Anzahl der gepulkten Fahrzeuge mit steigendem SV-Anteil (bei konstanter Verkehrsstärke), sondern eine Abnahme.

Dieser Effekt scheint ebenfalls **unplausibel**. Er deckt sich weder mit den Erkenntnissen anderer Untersuchungen, noch mit den Betrachtungen zu den Vorlaufstrecken innerhalb der 2+1-Strecken (vgl. Ziffer 10.4.3) und lässt sich auch nicht durch Multikollinearität erklären. Somit muss auch für **die Schätzung der Anzahl der gepulkten Fahrzeuge auf den Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken** festgestellt werden, dass diese **auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis nicht erfolgen kann**.

Bild 10.4 zeigt die für die Regressionsanalysen herangezogenen Daten der Vorlaufstrecken 1, 4, 11 und 14 sowie die aufgrund ihrer Besonderheiten nur der Vollständigkeit halber dargestellten Vorlaufstrecken 6, 8 und 10.

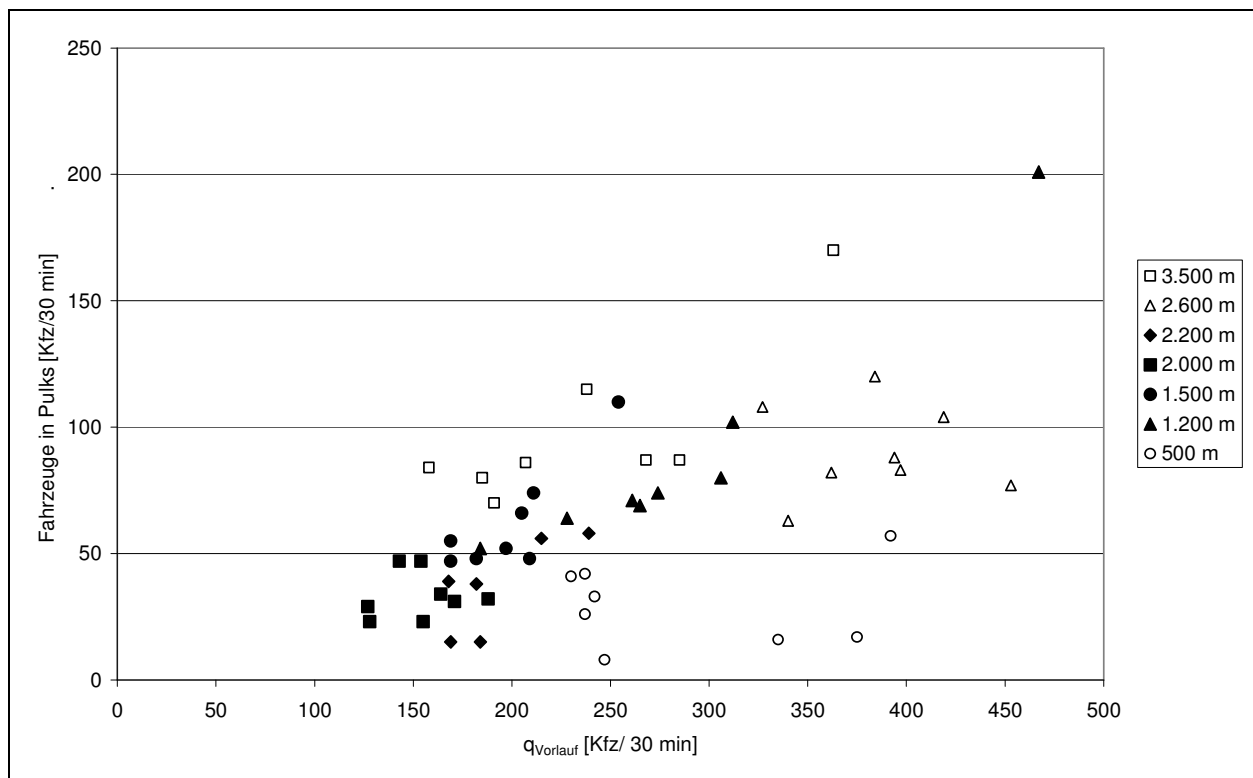


Bild 10.4: Anzahl der Fahrzeuge in Pulks auf Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf der Vorlaufstrecke und deren Länge

10.3.4 Pulkanteil

Bei den multiplen linearen Regressionen auf den Pulkanteil zeigte sich die zweifache Regression mit der Verkehrsstärke und dem SV-Anteil ($k=0$) als signifikant ($\alpha=0,05$), um den Regressanden zu schätzen. Die Länge der Vorlaufstrecke ist auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis zur Erklärung des Pulkanteils auf den Vorlaufstrecken außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke nicht notwendig.

Das in Gleichung 10.2 dargestellte Ergebnis der zweifachen Regression mit der Verkehrsstärke und dem SV-Anteil zeigt zwar die erwartungsgemäße Zunahme des Pulkanteils mit steigender Verkehrsstärke und/ oder steigendem SV-Anteil. Da die Schätzung des Pulkanteils mittels Gleichung 10.2 jedoch mit einem Bestimmtheitsmaß von lediglich $R^2 = 0,201$ erfolgen würde, muss auch von einer Bestimmung des Pulkanteils auf den Vorlaufstrecken außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke abgesehen werden.

Gleichung 10.2: $y_B = 0,084 x_1 + 0,664 x_2$ ($R^2 = 0,201$)

mit:

y = Pulkanteil [%]

x_1 = Verkehrsstärke [Kfz/30 Min]

x_2 = SV-Anteil [%]

Bild 10.5 zeigt die für die Regressionsanalysen herangezogenen Daten der Vorlaufstrecken 1, 4, 11 und 14 sowie die aufgrund ihrer Besonderheiten nur der Vollständigkeit halber dargestellten Vorlaufstrecken 6, 8 und 10.

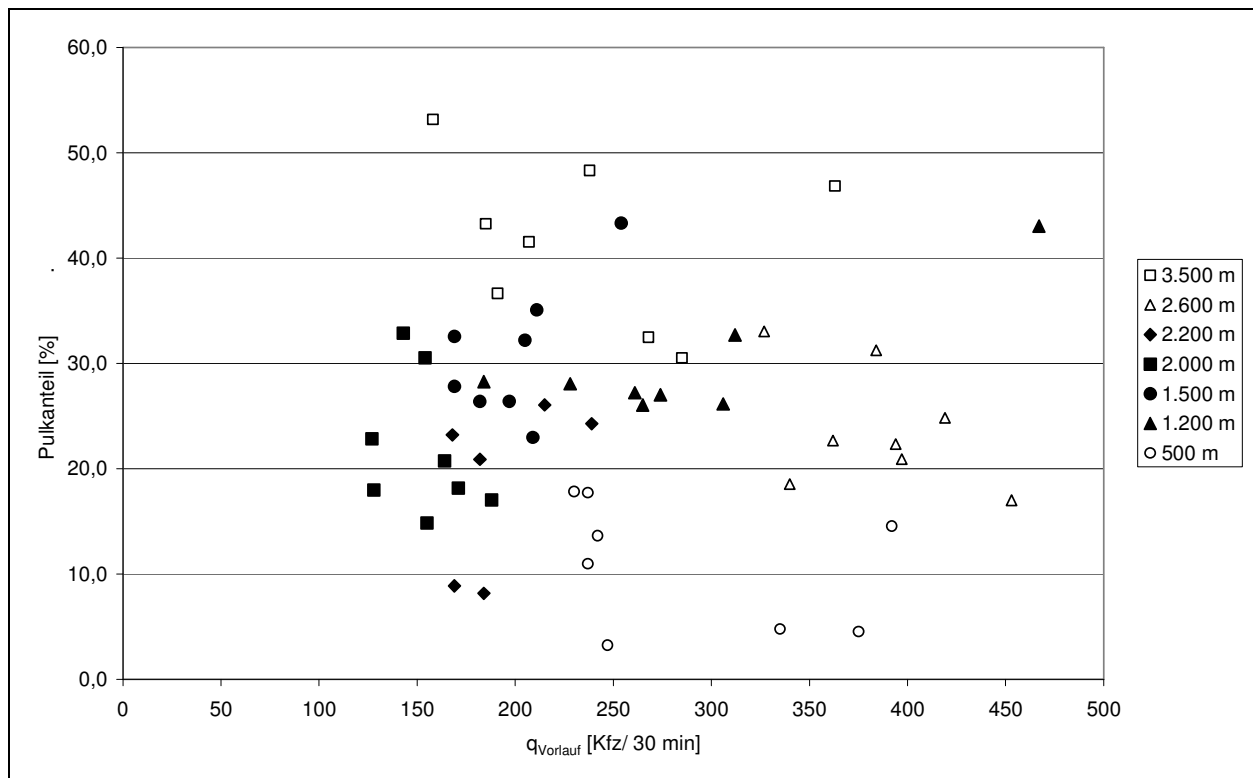


Bild 10.5: Pulkanteil auf Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf der Vorlaufstrecke und deren Länge

Aufgrund dieser fehlenden Erkenntnisse ist ein Vergleich mit den Ergebnissen früherer Arbeiten nur bedingt sinnvoll. Dennoch befindet sich im Anhang Ziffer 5 eine Überprüfung des von TRAPP (1971) aufgestellten Modells zur Bestimmung des Pulkanteils (vgl. Ziffer 2.5.2 bzw. Gleichung 2.6) auf Basis der Vorlaufstrecke Nr. 14. Als Ergebnisse kann festgehalten werden, dass das Modell den Pulkanteil bei den beiden zur Überprüfung herangezogenen Untersuchungsintervallen von je 1 h um 7 % überschätzt. Ursächlich dafür sind die beiden unterschiedlichen Pulkdefinitionen (vgl. Ziffern 2.5.2 und 4.5). Inwieweit die Differenz von 7 % zufällig oder als „exaktes“

Maß für den Unterschied der beiden Pulkdefinitionen gilt, bedürfte weiterer Untersuchungen, die auf Grundlage der vorliegenden Daten jedoch nicht erfolgen können.

Ein weiterer Vergleich kann mit den Ergebnissen von FROST, KELLER und KIRCHHOFF, 1989 (vgl. Ziffern 2.5.2 und 2.5.3) durchgeführt werden, die einen Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und dem Pulkanteil auf Basis ihrer Untersuchungen nachweisen konnten. Bild 10.6 zeigt den Pulkanteil für die Vorlaufstrecke Nr. 8, die mit einer Länge von 3.500 m die längste und somit durch vergleichsweise hohe Pulkanteile (vgl. Bild 10.5) gekennzeichnet ist, sowie der von FROST, KELLER, KIRCHHOFF entwickelte Trend, der den Pulkanteilen der Vorlaufstrecke Nr. 8 noch am ehesten entspricht.

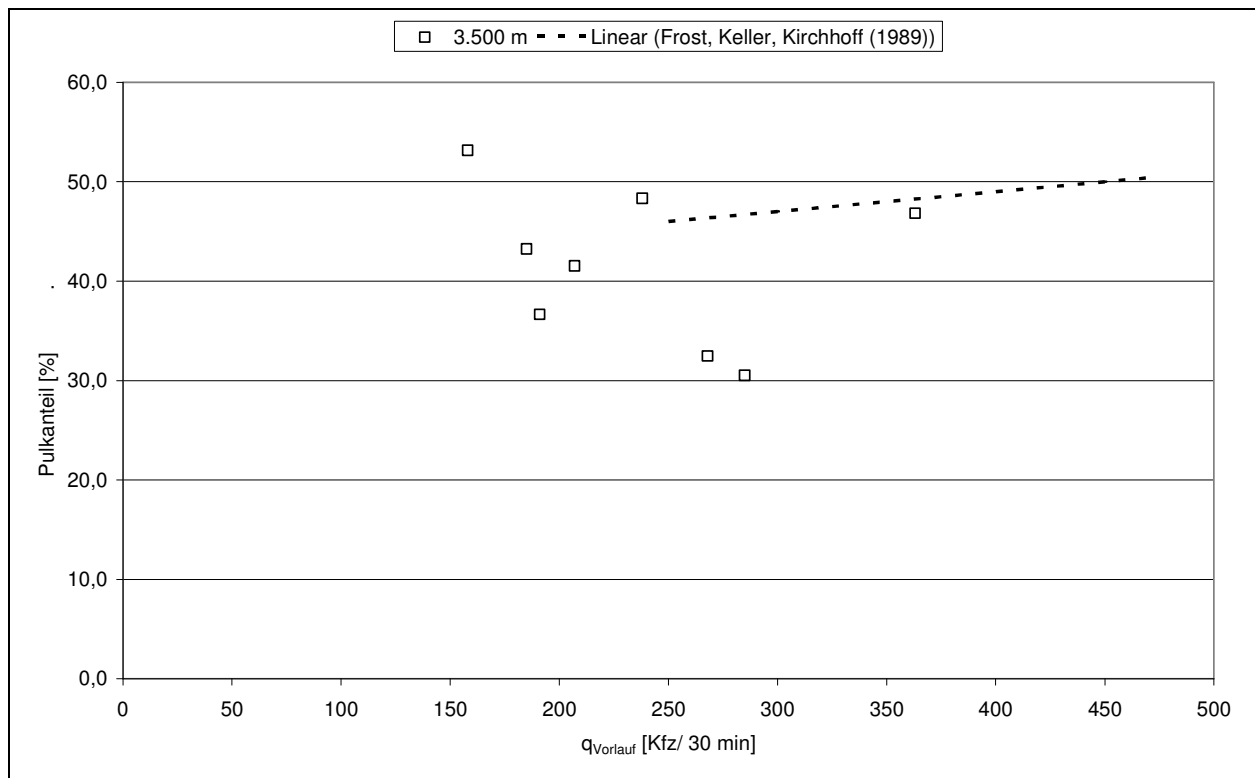


Bild 10.6: Vergleich der für die Vorlaufstrecke Nr. 8 ermittelten Pulkanteile mit dem von FROST, KELLER und KIRCHHOFF (1989) entwickelten Trend

10.3.5 Pulklänge

Ähnlich zur Bestimmung des Pulkanteils (vgl. Ziffer 10.3.4) zeigt sich auch bei der Schätzung der Pulklänge eine zweifache Regression als signifikant ($\alpha=0,05$). Die Kombination der Verkehrsstärke mit der Länge der Vorlaufstrecke ($k=0$) schätzt die Pulklänge jedoch nur mit einem relativ schwachen Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,353$.

Gleichung 10.3: $y_B = 0,009 x_1 + 0,001 x_3$ ($R^2 = 0,353$)

mit:

y = Pulklänge [Kfz]

x_1 = Verkehrsstärke [Kfz/30 Min]

x_3 = Länge der Vorlaufstrecke [m]

Das in Gleichung 10.3 dargestellte Ergebnis der zweifachen Regression mit der Verkehrsstärke und der Vorlaufstreckenlänge zeigt dabei die plausible Zunahme der Pulklänge mit steigender Verkehrsstärke und/ oder länger werdender Vorlaufstrecke.

Im Gegensatz zu den Analysen zu den Vorlaufstrecken, die innerhalb der 2+1-Strecken liegen (vgl. Ziffer 10.4.5), wurde an dieser Stelle darauf verzichtet, die übrigen Kenngrößen der Pulkbildung zur Schätzung der Pulklänge heranzuziehen. Da sich weder die Anzahl der Pulks, noch die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge, noch der Pulkanteil auf Vorlaufstrecken an Pos. 1 ausreichend genau mittels der dem Verkehrsplaner bekannten Größen bestimmen lassen, sind solche Betrachtungen nicht zielführend.

Bild 10.7 zeigt die für die Regressionsanalysen herangezogenen Daten der Vorlaufstrecken 1, 4, 11 und 14 sowie die aufgrund ihrer Besonderheiten nur der Vollständigkeit halber dargestellten Vorlaufstrecken 6, 8 und 10.

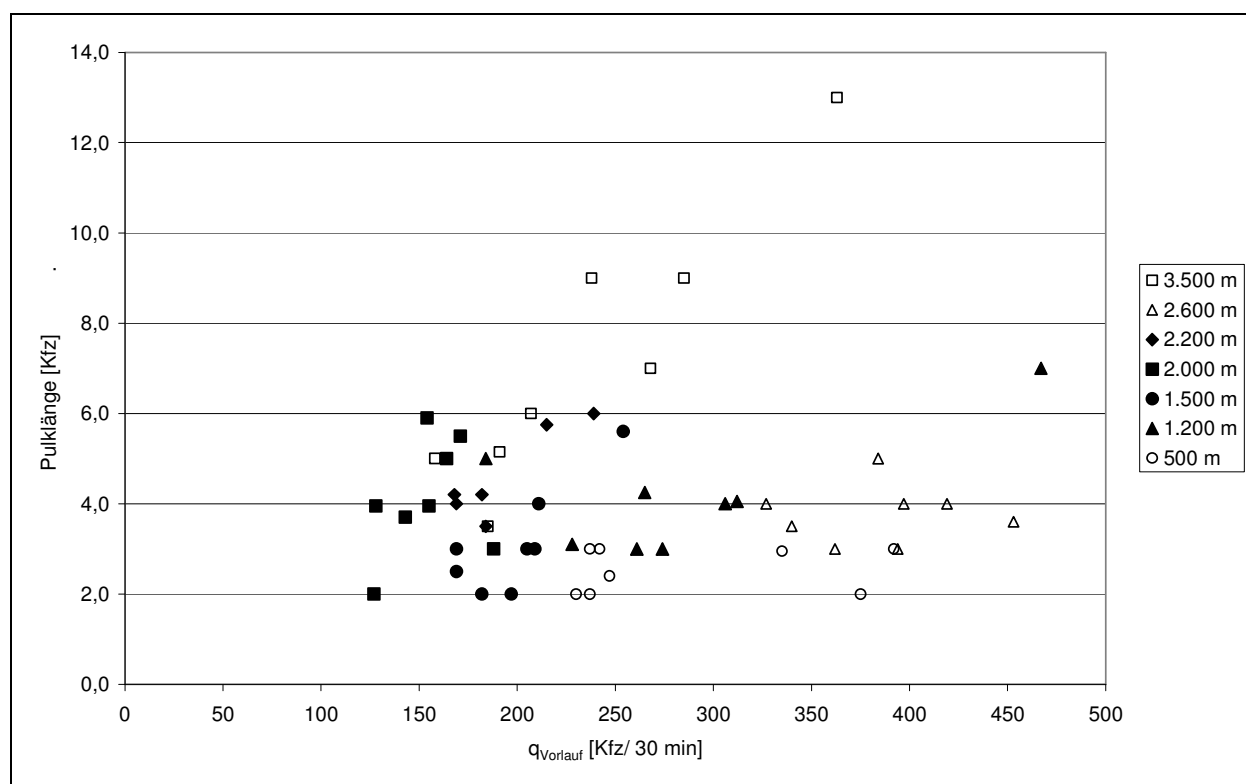


Bild 10.7: Pulklänge auf Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf der Vorlaufstrecke und deren Länge

Fazit

Als Fazit der Pulkanalyse auf Vorlaufstrecken, die sich außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke befinden, muss abschließend festgehalten werden, dass sich die Kenngrößen der Pulkbildung auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht oder nur relativ unbestimmt schätzen lassen. Ursächlich dafür ist u.a., dass drei der insgesamt sieben Vorlaufstrecken (Pos. 1) aufgrund von Besonderheiten von den Regressionsanalysen ausgeschlossen werden mussten und somit nur eine vergleichsweise kleine Datenbasis zur Verfügung stand.

Der Vergleich mit vorliegenden Arbeiten zur Pulkbildung auf zweistreifigen Landstraßen brachte keine weiterführenden Erkenntnisse.

10.4 Pulkbildung auf Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken

10.4.1 Allgemeines

Bei der Analyse der Pulkbildung innerhalb von 2+1-Strecken wird auch der Einfluss der absoluten Position (2 bis 4, vgl. z.B. Tabelle 10.1) mittels multipler Regressionen analysiert. Anhand von Modellreduktionen soll im Rahmen der multiplen Regressionen auf Grundlage des P-Werts (vgl. Ziffer 6.6.4) überprüft werden, ob und welche dieser Parameter für die Schätzung der Kenngrößen der Pulkbildung zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ notwendig sind.

Im Hinblick auf die multiplen Regressionsanalysen wurde die Multikollinearität (vgl. Ziffer 6.6.4) der Einflussgrößen auf die Pulkbildung (= Regressoren = Verkehrsstärke, SV-Anteil, Länge sowie absolute Position der Vorlaufstrecke) betrachtet. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass keine auf dem 0,05-Niveau signifikante Multikollinearität besteht.

10.4.2 Anzahl Pulks

Bei der multiplen linearen Regression mit den vier Regressoren Verkehrsstärke, SV-Anteil, Länge sowie absolute Position der Vorlaufstrecke zeigt der P-Wert, dass in dieser Kombination die Position zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ zur Erklärung der Anzahl der Pulks nicht notwendig ist und somit aus dem Modell reduziert werden kann (P-Wert = 0,946).

Das Ergebnis der dreifachen Regression mit der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge der Vorlaufstrecke liefert einen guten Zusammenhang mit der Anzahl der Pulks (vgl. Gleichung 10.4). Neben der Verkehrsstärke sind in dieser Kombination auch der SV-Anteil sowie die Vorlaufstreckenlänge mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % signifikant erforderlich, um die Anzahl der Pulks zu schätzen.

Gleichung 10.4: $y_B = 0,113 x_1 + 0,810 x_2 + 0,018 x_3 - 36,463$ ($R^2 = 0,818$)

mit:

y = Anzahl der Pulks	[Pulks/30 Min]
Index B = gemäß Pulkdefinition (B) dieser Untersuchung	
x_1 = Verkehrsstärke	[Kfz/30 Min]
x_2 = SV-Anteil	[%]
x_3 = Länge der Vorlaufstrecke	[m]
x_4 = absolute Position der Vorlaufstrecke	[-]

Nach Gleichung 10.4 nimmt die Anzahl der Pulks nicht nur mit ansteigender Verkehrsstärke und ansteigendem SV-Anteil, sondern auch mit länger werdender Vorlaufstrecke zu. Diese Effekte erscheinen logisch und decken sich auch mit den Erkenntnissen aus anderen Untersuchungen (z.B. ROOS, 1989).

Das Ergebnis der dreifachen Regression mit der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der absoluten Position liefert ebenfalls einen guten Zusammenhang mit der Anzahl der Pulks (vgl. Gleichung 10.5). Das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,789$ ist dabei etwas schlechter als das R^2 aus der dreifachen Regression mit der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge der Vorlaufstrecke (Gleichung 10.4). Neben der Verkehrsstärke sind in dieser Kombination demnach auch der SV-Anteil sowie die absolute Position mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % signifikant erforderlich, um die Anzahl der Pulks zu schätzen. Es fällt auf, dass der SV-Anteil einen nur noch etwa halb so großen Einfluss ausübt wie nach Gleichung 10.4.

Gleichung 10.5: $y_B = 0,109 x_1 + 0,423 x_2 + 3,964 x_4$ ($R^2 = 0,789$)

Wie Gleichung 10.5 zeigt, nimmt die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge nicht nur mit ansteigender Verkehrsstärke und ansteigendem SV-Anteil, sondern auch mit der Position zu. D.h., dass je weiter hinten eine Vorlaufstrecke innerhalb der 2+1-Strecke liegt, desto mehr Pulks sind dort bei gleicher Verkehrsstärke und gleichem SV-Anteil zu erwarten. Dieser Effekt ist nur schwer zu bewerten. Unbestritten ist, dass sich bereits vor der Ausfahrt aus dem Überholabschnitt neue Pulks bilden. Dies haben auch frühere Untersuchungen (vgl. z.B. BRANNOLTE, BASELAU und DONG, 2004) gezeigt, die sich im Gegensatz zu dieser Untersuchung auch mit der Pulkneubildung am Ende eines Überholabschnitts befasst haben.

Eine mögliche Erklärung läge in einer Multikollinearität zwischen der Position und der Länge der Vorlaufstrecke begründet, die sich aus der Auswahl der Untersuchungsstrecken ergeben hat. Mit einer relativ hohen Irrtumswahrscheinlichkeit von ca. 11 % zeigt sich ein äußerst schwacher Zusammenhang ($R^2 \approx 5\%$) zwischen der Position und der Länge der Vorlaufstrecke. Dabei nimmt bei der vorliegenden Datenbasis die Vorlaufstreckenlänge mit ansteigender Position zu. Somit läge dann der gleiche Effekt vor, wie er in Gleichung 10.4 enthalten ist. Dies würde auch erklären, warum die Position bei der vierfachen Regression (d.h. in Kombination mit der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge der Vorlaufstrecke) nicht signifikant zur Erklärung der Anzahl der Pulks getestet wurde, bei der dreifachen Regression ohne die Vorlaufstreckenlänge dann aber doch signifikant erforderlich ist.

KIRSCH und WOLFF (2005) konnten im Rahmen ihrer Projektarbeit einen signifikanten und guten Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der Anzahl der Pulks gemäß der Pulkdefinition (A) nach ROOS nachweisen. Bei einer Überprüfung auf Basis der Grundlagendaten von KIRSCH und WOLFF zeigt sich bei der zweifachen Regression mit der Verkehrsstärke und der Länge der Vorlaufstrecke diese ebenfalls als signifikant erforderlich, die Anzahl der Pulks zu erklären. Nach Gleichung 10.6 nimmt die Anzahl der Pulks mit steigender Verkehrsstärke und/oder länger werdender Vorlaufstrecke zu. Dieses Ergebnis ist plausibel und deckt sich mit den Erkenntnissen dieser und anderer Untersuchungen, insbesondere der von ROOS.

Gleichung 10.6: $y_A = 0,138 x_1 + 0,014 x_3$ ($R^2 = 0,860$)

mit:

y = Anzahl der Pulks [Pulks/30 Min]

Index A = gemäß Pulkdefinition (A) nach ROOS

KIRSCH und WOLFF zeigen weiterhin, dass sich in Abhängigkeit von der gewählten Pulkdefinition (Pulkdefinition A nach ROOS bzw. B nach Maßgabe dieser Untersuchung, vgl. Ziffer 4.5) bei gleicher Verkehrsstärke eine unterschiedliche Anzahl von Pulks ergibt. Erwartungsgemäß ergeben sich nach der Pulkdefinition A (nach ROOS) deutlich mehr Pulks als nach Pulkdefinition B. KIRSCH und WOLFF konnten einen signifikanten Zusammenhang ($\alpha=0,05$) zwischen den beiden nach unterschiedlichen Pulkdefinitionen ermittelten Pulkanzahlen bestimmen. Danach lässt sich die Anzahl der Pulks nach Definition B mit folgender Gleichung ermitteln:

Gleichung 10.7: $y_B = 0,694 y_A - 9,771$ ($R^2 = 0,709$)

Fazit

Die Pulkdefinition spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Anzahl der Pulks. Es besteht jedoch die Möglichkeit die Anzahl der Pulks nach der Definition dieser Arbeit (B) durch die Anzahl der Pulks gemäß der Definition nach ROOS (A) zu ermitteln.

Unter Verwendung der in dieser Arbeit festgelegten Pulkdefinition konnte zwischen der Anzahl der Pulks und der Verkehrsstärke in Kombination mit dem SV-Anteil ein guter Zusammenhang nachgewiesen werden. Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Datenbasis zeigte sich auch ein Einfluss aus der Länge bzw. der Position der Vorlaufstrecke. Während die Auswirkung der Vorlaufstreckenlänge als plausibel angesehen werden kann und sich mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen (z. B. auch ROOS) deckt, lässt sich der Einfluss der Position nicht abschließend erklären. Aus diesem Grund und der im Ansatz nachgewiesenen Multikollinearität zwischen der Position und der Länge der Vorlaufstrecke soll zur Schätzung der Anzahl der Pulks Gleichung 10.4 zur Anwendung kommen.

10.4.3 Fahrzeuge in Pulks

Bei der multiplen linearen Regression mit den vier Regressoren Verkehrsstärke, SV-Anteil, Länge sowie Position der Vorlaufstrecke zeigt der P-Wert, dass in dieser Kombination einzig die Verkehrsstärke zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ zur Erklärung der Anzahl der Fahrzeuge in Pulks notwendig ist.

Bei den dreifachen Regressionen mit der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge bzw. der Position der Vorlaufstrecke zeigt sich, dass bei der Kombination mit der Länge neben der Verkehrsstärke auch der SV-Anteil mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % signifikant erforderlich ist, um die Anzahl der Fahrzeuge in Pulks zu schätzen ($P\text{-Wert} = 2,4 \cdot 10^{-5}$). Der Einfluss der Vorlaufstreckenlänge ist nur zum 0,1-Niveau signifikant ($P\text{-Wert} = 0,094$). Bei der Kombination mit der Position der Vorlaufstrecke sind diese und der SV-Anteil nur auf dem 0,06-Niveau signifikant, um die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge zu schätzen.

Die Signifikanz des SV-Anteils wird durch die zweifache Regression mit der Verkehrsstärke und einzig dem SV-Anteil bestätigt ($P\text{-Wert} = 8,9 \cdot 10^{-5}$).

Aufgrund der Erkenntnisse zur Anzahl der Pulks (vgl. Ziffer 10.4.2), der Literaturanalyse (vgl. vor allem Ziffer 2.5.3) sowie aus Plausibilitätsgründen wird abweichend vom ursprünglich festgelegten Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ (vgl. Ziffer 6.6.4) für die Schätzung der Anzahl der Fahrzeuge in Pulks (ausnahmsweise) der in Gleichung 10.8 enthaltene, lediglich auf dem 0,1-Niveau signifikante Einfluss der Vorlaufstreckenlänge akzeptiert. Gleichung 10.8 zeigt das Ergebnis der dreifachen Regressionen mit der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge der Vorlaufstrecke. Demnach nimmt erwartungsgemäß mit ansteigender Verkehrsstärke und/oder steigendem SV-Anteil und/oder länger werdender Vorlaufstrecke auch die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge zu.

Gleichung 10.8:
$$y_B = 0,390 x_1 + 1,527 x_2 + 0,022 x_3 - 78,581 \quad (R^2 = 0,876)$$

mit:

y = Anzahl der Fahrzeuge in Pulks	[Kfz/30 Min]
Index B = gemäß Pulkdefinition (B) dieser Untersuchung	
x ₁ = Verkehrsstärke	[Kfz/30 Min]
x ₂ = SV-Anteil	[%]
x ₃ = Länge der Vorlaufstrecke	[m]

KIRSCH und WOLFF konnten auch unter der Verwendung der Pulkdefinition nach ROOS (Pulkdefinition A) einen signifikanten und äußerst guten Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke auf der Vorlaufstrecke und der Anzahl der gepulkten Fahrzeuge nachweisen (vgl. Gleichung 10.9). Die multiplen Regressionen mit dem SV-Anteil und/ oder der Vorlaufstreckenlänge führten zu keinen signifikanten Ergebnissen ($\alpha=0,05$). Die Untersuchung von KIRSCH und WOLFF kann im Hinblick auf die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge somit die Erkenntnisse dieser Untersuchung nicht bestätigen.

Gleichung 10.9: $y_A = 0,908 x_1 - 38,839$ ($R^2 = 0,964$)

mit:

y = Anzahl der Fahrzeuge in Pulks [Kfz/30 Min]

Index A = gemäß Pulkdefinition (A) nach ROOS

Erwartungsgemäß ist unter der Verwendung der Pulkdefinition A (nach ROOS) die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge deutlich größer (mehr als das Doppelte) als mit Pulkdefinition B. KIRSCH und WOLFF konnten aber auch hier einen Zusammenhang zwischen den beiden nach unterschiedlichen Pulkdefinitionen ermittelten Werten bestimmen. Danach lässt sich die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge nach Definition B mit folgender Gleichung ermitteln:

Gleichung 10.10: $y_B = 0,437 y_A$ ($R^2 = 0,844$)

Fazit

Erwartungsgemäß übt auch auf die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge die Pulkdefinition einen entscheidenden Einfluss aus.

Es konnte unter Verwendung der in dieser Arbeit festgelegten Pulkdefinition ein guter Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in Kombination mit dem SV-Anteil und der Anzahl der gepulkten Fahrzeugen nachgewiesen werden. Einflüsse aus der Länge bzw. der Position der Vorlaufstrecke zeigten sich lediglich zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,10$. Da sich, wie auch schon bei der Anzahl der Pulks (vgl. Ziffer 10.4.2), die Auswirkung der Position einer weitgehenden Plausibilitätsprüfung entzieht und bei dieser Kombination auch der SV-Anteil nur einen zum 0,1-Niveau signifikanten Beitrag zur Erklärung des Regressanden liefert, soll zur Schätzung der Anzahl der gepulkten Fahrzeuge Gleichung 10.8 herangezogen werden.

10.4.4 Pulkanteil

Bei der multiplen linearen Regression mit den vier Regressoren Verkehrsstärke, SV-Anteil, Länge sowie Position der Vorlaufstrecke zeigt der P-Wert, dass in dieser Kombination (mit $k = 0$) die Länge der Vorlaufstrecke zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ zur Erklärung des Pulkanteils nicht notwendig ist und somit aus dem Modell reduziert werden kann.

Die Ergebnisse der dreifachen Regressionen ($k = 0$) mit der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge (vgl. Gleichung 10.11) bzw. der Position der Vorlaufstrecke (vgl. Gleichung 10.12) zeigen jeweils für alle drei Regressoren, dass diese zur Erklärung des Pulkanteils signifikant erforderlich sind ($\alpha=0,05$). Das Bestimmtheitsmaß ist jedoch mit lediglich $R^2 = 0,529$ bzw. $0,562$ nicht so gut wie bei den Kenngrößen Anzahl der Pulks bzw. Fahrzeuge in Pulks (vgl. Ziffer 10.4.2 bzw. 10.4.3).

Gleichung 10.11: $y_B = 0,042 x_1 + 0,628 x_2 + 0,006 x_3$ ($R^2 = 0,529$)

Gleichung 10.12: $y_B = 0,040 x_1 + 0,326 x_2 + 4,677 x_4$ ($R^2 = 0,562$)

mit:

y = Pulkanteil [%]

Index B = gemäß Pulkdefinition (B) dieser Untersuchung

x_1 = Verkehrsstärke [Kfz/30 Min]

x_2 = SV-Anteil [%]

x_3 = Länge der Vorlaufstrecke [m]

x_4 = absolute Position der Vorlaufstrecke [-]

Die Gleichungen zeigen, dass bei gleichbleibender Verkehrsstärke und konstantem SV-Anteil sowohl eine zunehmender Länge der Vorlaufstrecke als auch eine ansteigende Position der Vorlaufstrecke zu einer Zunahme des Pulkanteils führt.

ROOS (1989) hatte in seiner Arbeit ebenfalls einen Zusammenhang zwischen dem Pulkanteil und der Verkehrsstärke in Abhängigkeit vom SV-Anteil sowie der Länge der einstreifigen Vorlaufstrecke ermittelt (vgl. Ziffer 2.5.3). Danach nimmt der Pulkanteil ebenfalls erwartungsgemäß mit länger werdender Vorlaufstrecke zu. Die im Rahmen dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse können somit die Ergebnisse von ROOS bestätigen. Es gilt dabei jedoch die unterschiedlichen Pulkdefinitionen zu berücksichtigen.

KIRSCH und WOLF (2005) wiesen in ihrer Projektarbeit unter Verwendung der gleichen Videoaufnahmen, die im Rahmen dieser Untersuchung aufgenommen wurden, jedoch unter Zugrundelegung der Pulkdefinition nach ROOS (vgl. Ziffer 6.8) ebenfalls einen guten Zusammenhang zwischen dem Pulkanteil und der Verkehrsstärke unter Berücksichtigung des SV-Anteils sowie der Länge der Vorlaufstrecke nach. Nach Gleichung 10.13 nimmt der Pulkanteil mit steigender Verkehrsstärke und/ oder SV-Anteil und/ oder länger werdender Vorlaufstrecke zu.¹⁷ Dieses Ergebnis ist plausibel und deckt sich mit den Erkenntnissen dieser und der Untersuchung von ROOS.

Gleichung 10.13: $y_A = 0,098 x_1 + 0,477 x_2 + 0,018 x_3$ ($R^2 = 0,820$)

mit:

y = Pulkanteil [%]

Index A = gemäß Pulkdefinition (A) nach ROOS

Bild 10.8 zeigt den Vergleich des nach den Ergebnissen von KIRSCH und WOLFF geschätzten Pulkanteils mittels Gleichung 10.13 mit dem im Nomogramm von ROOS dargestellten Pulkanteil (vgl. Bild 2.7). Um eine Vergleichbarkeit mit den Angaben von ROOS zu gewährleisten, wurde zur Bestimmung des Pulkanteils ein konstanter SV-Anteil von 10 % in Gleichung 10.13 eingesetzt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass insbesondere bei geringeren Verkehrsstärken von einer guten Übereinstimmung gesprochen werden kann. Bei den größeren Verkehrsstärken kommt es aufgrund der von ROOS gewählten logarithmischen Schätzfunktion zu einer teilweise deutlichen Überschätzung des mit Hilfe von Gleichung 10.13 geschätzten Pulkanteils.

¹⁷ Im Gegensatz zu der in der Arbeit von KIRSCH und WOLF angegebenen Gleichung zeigte eine Überprüfung auf Basis der Grundlegendaten von KIRSCH und WOLF, dass die Konstante aus dem Modell zu eliminieren ist.

Mit der Pulkdefinition A (nach ROOS) ist auch der Anteil der gepulkten Fahrzeuge (erwartungsgemäß) deutlich größer (mehr als das Doppelte) als mit Pulkdefinition B. Gleichung 10.14 zeigt den logarithmischen Zusammenhang zwischen den beiden nach unterschiedlichen Pulkdefinitionen ermittelten Werten.

Gleichung 10.14: $y_B = 29,255 \ln(y_A) - 91,837$ ($R^2 = 0,533$)

Im Gegensatz zu KIRSCH und WOLF konnten BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004), die in ihrer Arbeit ebenfalls die gleiche Pulkdefinition wie ROOS verwendeten, keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen dem Anteil der behinderten Fahrzeuge und der Verkehrsstärke ableiten. Sie formulierten lediglich die tendenzielle Aussage, dass der Pulkanteil bei zunehmender Verkehrsstärke ebenfalls ansteigt.

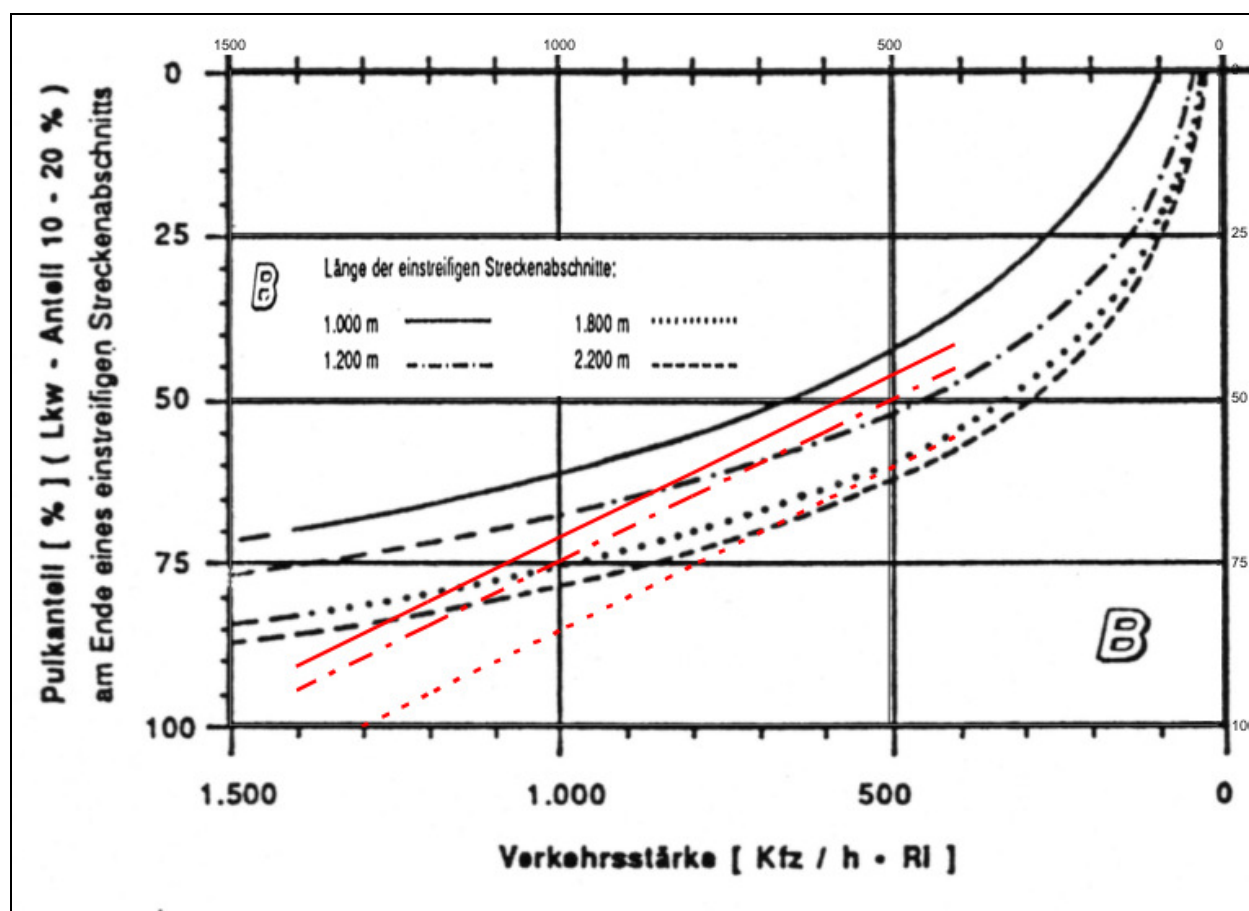


Bild 10.8: Vergleich der nach den modifizierten Ergebnissen von KIRSCH und WOLFF geschätzten Pulkanteile mit den im Nomogramm von ROOS dargestellten Pulkanteilen (vgl. Bild 2.7)

Fazit

Erwartungsgemäß übt die Pulkdefinition auch auf die Bestimmung des Pulkanteils einen entscheidenden Einfluss aus. Unter Verwendung der in dieser Arbeit festgelegten Pulkdefinition konnte ein Einfluss der Verkehrsstärke und dem SV-Anteil nachgewiesen werden. Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Datenbasis zeigte sich in Analogie zu der Anzahl der Pulks (vgl. Ziffer 10.4.2) auch ein Einfluss aus der Länge bzw. der Position der Vorlaufstrecke. Unter Verwendung der Pulkdefinition nach ROOS zeigt sich neben der Verkehrsstärke und dem SV-Anteil zwar auch der signifikante ($\alpha=0,05$) Einfluss der Länge, jedoch nicht der Position der Vorlaufstrecke. Somit kann in Analogie zur Bestimmung der Anzahl der Pulks (vgl. Ziffer 10.4.2) auch für die Bestimmung des Pulkanteils festgehalten werden, dass die Auswirkung der Vorlaufstreckenlänge als plausibel angesehen werden können und sich mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen (z. B. ROOS) decken. Im Gegensatz dazu lässt sich der Einfluss der Position nicht abschließend erklären.

Aus diesen Gründen empfiehlt es sich, zur Schätzung des Pulkanteils Gleichung 10.11 heranzuziehen. Da jedoch das zugehörige Bestimmtheitsmaß im Vergleich zur Bestimmung des Pulkanteils mittels der Pulkdefinition nach ROOS deutlich niedriger liegt, soll im Folgenden versucht werden, den Pulkanteil auf Basis der vorab beschriebenen Erkenntnisse dieser (Gleichung 10.11) und der Untersuchung von KIRSCH und WOLF (Gleichung 10.13 und Gleichung 10.14) zu schätzen und beide Verfahren miteinander zu vergleichen.

Bestimmung des Pulkanteils

Um das „bessere“ Verfahren zur Schätzung des Pulkanteils zu ermitteln, werden beide zur Anwendung kommenden Modelle mittels des Theil'schen Ungleichheitskoeffizienten (vgl. Ziffer 6.6.5) mit den empirischen (= realen) Daten verglichen. Als Bewertungsmaßstab wird die Summe aus den prozentualen Abweichungen des Theil'schen Ungleichheitskoeffizient U und seiner drei Fehleranteilen U^M , U^S und U^C von ihrem jeweiligen Zielwert (vgl. Ziffer 6.6.5) herangezogen. Das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen den beiden gegenüberzustellenden Datenreihen wird dabei indirekt über die Berechnung des Kovarianzanteils U^C berücksichtigt.

Tabelle 10.2 enthält die Ergebnisse für den jeweiligen Ungleichheitskoeffizient U und die entsprechenden drei Fehleranteile U^M , U^S und U^C für die beiden zu vergleichenden Verfahren. Die für die Berechnung der Koeffizienten erforderlichen Grundlagen sind im Anhang Ziffer A 6 dargestellt.

	U	U^M	U^S	U^C	Summe
SOLL	0	0	0	1	Min!
IST mit Gleichung 10.11	0,1160	0,0002	0,2613	0,7566	
Abweichung vom SOLL mit Gleichung 10.11 [%]	12	0	26	24	62
IST mit Gleichung 10.13 und Gleichung 10.14	0,1292	0,0000	0,2087	0,8094	
Abweichung vom SOLL mit Gleichung 10.13 und Gleichung 10.14 [%]	13	0	21	19	53

Tabelle 10.2: Ergebnis des Modellvergleichs für die Bestimmung des Pulkanteils anhand des Theil'schen Ungleichheitskoeffizient U

Fazit

In Anlehnung an FRIEDRICH, IRZIK und HOFFMANN kann von einer ausreichenden Übereinstimmung der Datenreihen ausgegangen werden, wenn sowohl der Theil'sche Ungleichheitskoeffizient U , als auch die drei Fehleranteile U^M , U^S und U^C weniger als 20% von ihrem Zielwert abweichen. Somit verletzt die Bestimmung des Pulkanteils mit Gleichung 10.11 und streng genommen auch mit Gleichung 10.13 und Gleichung 10.14 diese Maßgabe. Da bei letzterem Verfahren die Überschreitung jedoch nur beim Nicht-Effizienz Anteil U^S um weniger als 1 % vorliegt, bei allen anderen jedoch teilweise deutlich unterschritten wird, wird empfohlen erst den Pulkanteil gemäß der Pulkdefinition nach ROOS (Gleichung 10.13) zu bestimmen und dann auf den Pulkanteil gemäß der dieser Untersuchung zugrunde liegenden Pulkdefinition umzurechnen (Gleichung 10.14).¹⁸

10.4.5 Pulklänge

Bild 10.9 zeigt die Häufigkeitsverteilung der 85 %-igen Pulklänge. Es deutet darauf hin, dass es sich bei der Pulklänge von 8,8 Kfz um einen so genannten Ausreißer handelt. Da Ausreißer die Ergebnisse statistischer Analysen maßgeblich beeinflussen können, sollten solche Werte aus der entsprechenden Stichprobe entfernt werden. Dazu muss jedoch entschieden werden, ob es sich dabei tatsächlich um einen Ausreißer oder lediglich um einen „extremen“ Wert einer Stichprobe handelt, der in der Stichprobe enthalten bleiben sollte. Um diese Entscheidung zu treffen, gibt es eine Vielzahl statistischer (Ausreißer-)Tests. Die Nullhypothese H_0 lautet dabei, dass der zu testende Wert ein Stichprobenwert aus der zugehörigen Grundgesamtheit ist. Eine Annahme der Nullhypothese bedeutet dann, dass es sich mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit α um keinen Ausreißer handelt. Die Annahme der Alternativhypothese H_1 bedeutet dementsprechend, dass ein Stichprobenwert aus einer Grundgesamtheit mit einem größeren bzw. kleineren Mittelwert stammt und somit aus der Stichprobe eliminiert werden kann bzw. muss.

Bei statistischen Tests muss zwischen den parametrischen und den nicht-parametrischen Tests unterschieden werden (vgl. Ziffer 6.6.4). Mittels des χ^2 -Test (vgl. Ziffer 6.6.4 sowie Anhang Ziffer A 3.2) wurde überprüft, ob die ermittelten 0,85-Quantile der Pulklänge normalverteilt sind. Die (Null-)Hypothese „Die Pulklängen sind normalverteilt.“ muss jedoch mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % verworfen werden.

Da die Pulklänge keiner Normalverteilung folgt, darf ein (parametrischer) Ausreißertest, der Normalverteilung voraussetzt (z.B. nach NALIMOV, 1963 oder GRUBBS (in PRIEMER, 2004)), nicht durchgeführt werden. Um dennoch zu testen, ob es sich bei $PL_{85} = 8,8$ Kfz um einen Ausreißer handelt, muss daher ein nicht-parametrischer Ausreißertest zur Anwendung kommen. Der Ausreißertest nach WALSH (in HÜFTLE, 2007) kann bei nicht-normalverteilten Daten verwendet werden. Das Vorgehen und die dabei festgelegten Vereinbarungen, insbesondere zum gewählten Signifikanzniveau für die Annahme bzw. das Verwerfen der Nullhypothese, sind im Anhang Ziffer A 7 aufgeführt. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass mit einer Irrtumswahrschein-

¹⁸ Diese Empfehlung erfolgt allein auf Basis des Theil'sche Ungleichheitskoeffizient, bei dem das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen den beiden zu vergleichenden Datenreihen lediglich indirekt über die Berechnung des Kovarianzanteils berücksichtigt wird. Wäre dieses Bestimmtheitsmaß direkt zur Entscheidung herangezogen worden, wäre das das höhere Bestimmtheitsmaß bedingende Verfahren mit Gleichung 10.11 zu wählen gewesen (vgl. Anhang Bild A 6.1 und A 6.2).

lichkeit von 20 %, die Nullhypothese zu verwerfen ist und die $PL_{85} = 8,8$ Kfz somit ein Ausreißer wäre.¹⁹ Das (α -) Risiko, einen Fehler 1. Art (fälschliche Ablehnung von H_0 , vgl. Tabelle 6.1) zu begehen, ist dabei zwar mit 20 % relativ hoch, dementsprechend gering ist dann aber auch das (β -) Risiko dafür, dass die Nullhypothese fälschlicherweise angenommen würde und man somit einen „tatsächlichen“ Ausreißer nicht erkannt hätte.

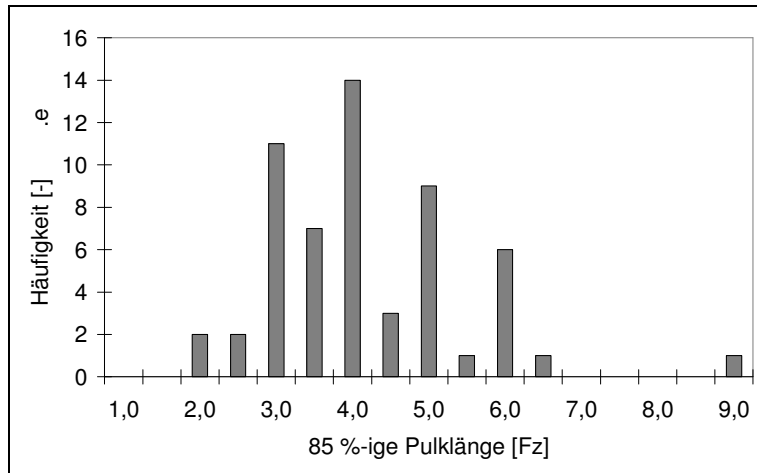


Bild 10.9: Häufigkeitsverteilung der ermittelten 85 %-igen Pulklänge für Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken (n=57)

Fazit

Im Folgenden wird die um die $PL_{85} = 8,8$ Kfz bereinigte Stichprobe für die durchzuführenden statistischen Berechnungen verwendet.

Bei der multiplen linearen Regression mit den vier, dem Verkehrsplaner zur Verfügung stehenden Regressoren Verkehrsstärke, SV-Anteil, Länge sowie Position der Vorlaufstrecke zeigt der P-Wert, dass in dieser Kombination einzig die Verkehrsstärke zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ zur Erklärung der 85 %-igen Pulklänge erforderlich ist. Weitere Reduktionen und die somit getesteten Kombinationen führen zu keinen neuen signifikanten Erkenntnissen. Die signifikante einfache Regression mittels der Verkehrsstärke zeigt zwar den tendenziellen Anstieg der Pulklänge mit zunehmender Verkehrsstärke, jedoch erfolgt die Schätzung der 85 %-igen Pulklänge mittels Gleichung 10.15 lediglich mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,394$.

Gleichung 10.15: $y = 0,0057x_1 + 2,3017$ ($R^2 = 0,394$)

mit:

$$y = 85 \text{ \%-ige Pulklänge} \quad [Fz]$$

$$x_1 = \text{Verkehrsstärke} \quad [Kfz/30 \text{ Min}]$$

¹⁹ Bei diesem Signifikanzniveau wird erst ein $PL_{85} < 8,5$ Kfz nicht mehr als Ausreißer getestet.

Fazit

Die ermittelten Ergebnisse spiegeln nicht die Erkenntnisse von ROOS wider und es erscheint unplausibel, dass der SV-Anteil und die Vorlaufstreckenlänge keinen signifikanten Einfluss auf die Pulklänge ausüben. In seiner Arbeit hatte ROOS (1989) einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Fahrzeuge im Pulk (= Pulklänge) und der Verkehrsstärke in Abhängigkeit vom SV-Anteil sowie der Länge der einstreifigen Vorlaufstrecke ermittelt (vgl. z.B. Bild 2.7). Die von ROOS identifizierten Einflüsse erscheinen im Gegensatz zu der Erkenntnis auf Grundlage dieser Untersuchung plausibel. Es sollte daher nicht davon ausgegangen werden, dass der SV-Anteil sowie die Länge der einstreifigen Vorlaufstrecke keinen Einfluss auf die Pulklänge ausüben. Vielmehr ist es wahrscheinlicher, dass diese Einflüsse auf Basis der vorliegenden Datenbasis in Kombination mit der verwandten Pulkdefinition von den entwickelten Modellen nicht erkannt werden.

Um die Pulklänge evtl. doch noch plausibel schätzen zu können, wird im Folgenden analysiert, welche Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Kenngrößen der Pulkbildung und der Pulklänge bestehen. So ist es z.B. nahe liegend, eine zweifache Regression mit der Anzahl der Pulks bzw. den Fahrzeugen in Pulks durchzuführen.²⁰ Dividiert man die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge durch die Pulkanzahl, so erhält man die theoretische durchschnittliche Pulklänge im Betrachtungsintervall. Es soll daher überprüft werden, ob sich daraus die empirische Pulklänge ableiten lässt. Gleichung 10.16 zeigt das Ergebnis der Regressionsanalyse. Mittels der beiden signifikanten ($\alpha=0,05$) Kenngrößen kann die 85 %-ige Pulklänge mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,580$ prognostiziert werden.

Gleichung 10.16: $y_B = 3,890 - 0,116 x_5 + 0,046 x_6$ ($R^2 = 0,580$)

mit:

y	=	85 %-ige Pulklänge	[m]
x_5	=	Anzahl der Pulks	[Pulks/30 Min]
x_6	=	Anzahl der Fahrzeuge in Pulks	[Kfz/30 Min]

Unter Berücksichtigung der in den Ziffern 10.4.2 und 10.4.3 gewonnenen Ergebnisse lässt sich Gleichung 10.16 folgendermaßen interpretieren:

- Bei gleicher Pulkanzahl, aber zunehmender Anzahl gepulκτη Fahrzeuge nimmt die Pulklänge zu. Dieser Effekt ist logisch und plausibel.
- Durch die in Gleichung 10.4 sowie Gleichung 10.8 enthaltenen Effekte führt eine höhere Verkehrsstärke zu einem Anstieg der Pulklänge; ein Effekt, der ebenfalls plausibel ist.
- Ein ansteigender SV-Anteil führt zu kleineren Pulkängen. D.h., dass desto mehr SV-Fahrzeuge die Vorlaufstrecke befahren, desto mehr aber kürzere Pulks entstehen. Auch dieser Effekt erscheint logisch. Je größer der SV-Anteil, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit, dass sich vermehrt langsam fahrende SV-Fahrzeuge auf einer Vorlaufstrecke befinden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass schneller fahrende Fahrzeuge auf ein Langsames auffahren. Andersherum werden die Pulkängen bei einer Abnahme des SV-Anteils geringer, weil dann die Wahrscheinlichkeit, dass schnellere Fahrzeuge auf ein Langsames auffahren geringer wird.

²⁰ Auch der Pulkanteil ist ein signifikanter Regressor, um die Pulklänge zu schätzen. Jedoch ist der Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von lediglich $R^2 = 0,134$ als unzureichend zu bezeichnen. Dieser Ansatz wird daher nicht weiter verfolgt.

- Da die Anzahl der Pulks äußerst sensibel auf eine Veränderung der Vorlaufstreckenlänge reagiert, sich die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge jedoch relativ resistent verhält, führt eine länger werdende Vorlaufstrecke zunächst einmal zu einem deutlichen Anstieg der Pulkanzahl. Da die Anzahl der gepulkten Fahrzeuge insgesamt dann jedoch nahezu konstant bleibt, bedeutet dies mathematisch, dass die Pulklängen geringer werden. ROOS hatte in seiner Arbeit einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Fahrzeuge im Pulk (= Pulklänge) und der Verkehrsstärke in Abhängigkeit vom SV-Anteil sowie der Länge der einstreifigen Vorlaufstrecke ermittelt (vgl. z.B. Bild 2.7). Danach nimmt die Pulklänge jedoch erwartungsgemäß auch mit länger werdender Vorlaufstrecke zu. Die im Rahmen dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse spiegeln somit nicht die Ergebnisse von ROOS wider und erscheinen darüber hinaus unplausibel.

KIRSCH und WOLF (2005) wiesen in ihrer Projektarbeit unter Verwendung der gleichen Videoaufnahmen, die im Rahmen dieser Untersuchung aufgenommen wurden, jedoch unter Zugrundelegung der Pulkdefinition (A) nach ROOS (vgl. Ziffer 6.8) einen signifikanten und guten Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der 85 %-igen Pulklänge nach. Die darüber hinaus betrachteten Einflüsse aus dem SV-Anteil und/ oder aus der absoluten Position und/ oder der Länge der Vorlaufstrecke zeigten sich auch bei der Untersuchung von KIRSCH und WOLF als nicht signifikant, um die Pulklänge zu erklären. Dieses Ergebnis steht somit wiederum im Gegensatz zur Arbeit von ROOS.

An diesem Umstand ändert sich im Hinblick auf den Einfluss der Vorlaufstreckenlänge, dass für diese zumindest indirekt ein signifikanter Einfluss festgestellt werden kann. Anhand der Grundlagendaten von KIRSCH und WOLF gelang es, einen signifikanten und guten Zusammenhang mit der Anzahl der Pulks in Kombination mit den Fahrzeugen in Pulks und der Pulklänge nachzuweisen. Da zur Schätzung der Anzahl der Pulks (vgl. Ziffern 10.4.2) sich neben der Verkehrsstärke auch die Vorlaufstreckenlänge als signifikanter Einfluss zeigte, nimmt die Pulkanzahl mit steigender Vorlaufstreckenlänge zu (vgl. Gleichung 10.6). Da zur Bestimmung der Anzahl der Fahrzeuge in Pulks jedoch nur die Verkehrsstärke als signifikante Variable im Modell enthalten ist (vgl. Gleichung 10.9) tritt der gleiche Effekt wie auch bei der Analyse der Pulklänge mit der Pulkdefinition nach Maßgabe dieser Untersuchung (Pulkdefinition B) auf. Die Pulklänge nimmt mit zunehmender Vorlaufstreckenlänge ab. Wie bereits oben aufgeführt, wird dieses Ergebnis als unplausibel eingeschätzt.

In einem weiteren, die Arbeit von KIRSCH und WOLF ergänzenden Arbeitsschritt wurde auch eine Regression auf die Pulklänge mit dem nach der Pulkdefinition (A) nach ROOS bestimmten Pulkanteil durchgeführt. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass ein signifikanter ($\alpha=0,05$) und guter Zusammenhang zwischen diesen beiden Kenngrößen der Pulkbildung besteht. Bild 10.10 zeigt das Ergebnis der Regressionsanalyse. Der exponentielle Ansatz beschreibt den Zusammenhang dabei mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,850$ nicht nur relativ gut, sondern bildet auch den vergleichsweise stärkeren Anstieg der 85 %-igen Pulklänge bei Pulkanteilen von über 75 % ab. Ein quadratischer Ansatz würde diesen Anstieg zwar noch besser beschreiben, jedoch führt dieser Ansatz bei sehr kleinen Pulkanteilen zu negativen Pulklängen.

Unter Berücksichtigung von Gleichung 10.13 nimmt der Pulkanteil und somit auch die Pulklänge mit steigender Verkehrsstärke und/ oder SV-Anteil und/ oder länger werdender Vorlaufstrecke zu. Dieses Ergebnis ist somit nicht nur plausibel, sondern deckt sich auch mit den Erkenntnissen der Untersuchung von ROOS.

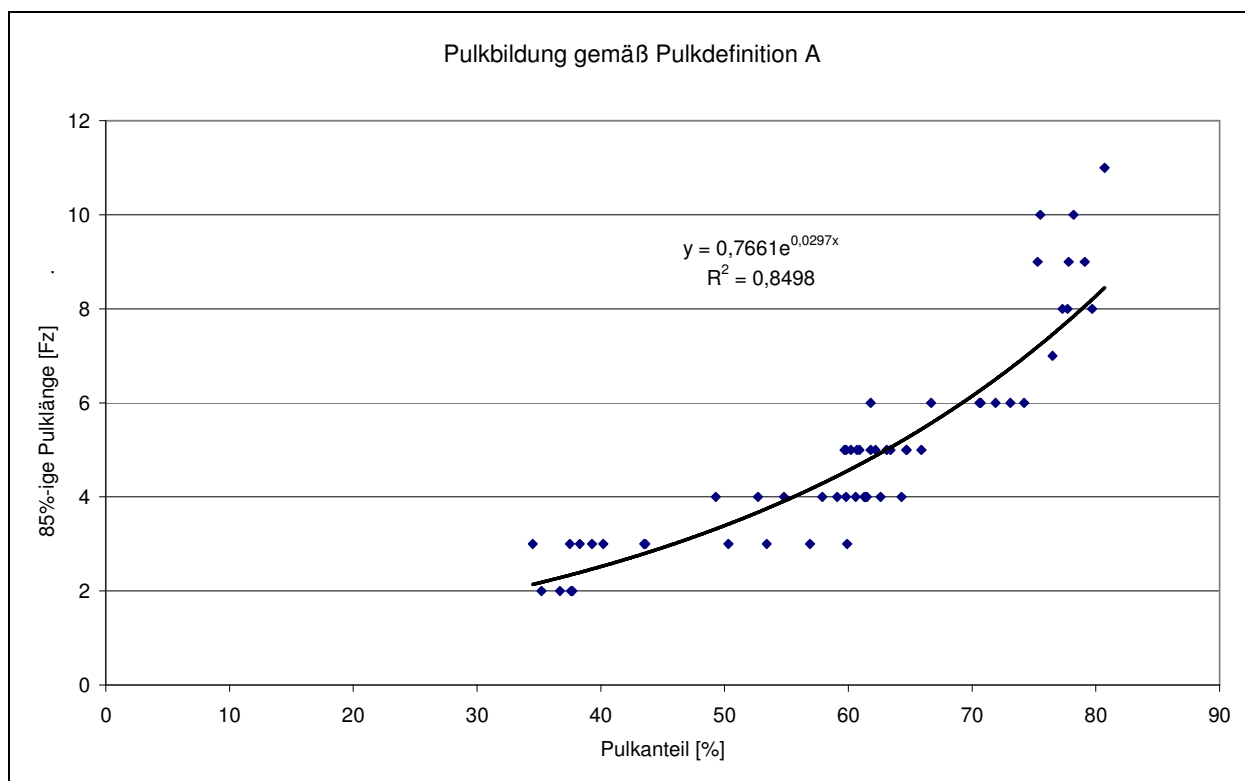


Bild 10.10: Zusammenhang zwischen dem Pulkanteil und der 85 %-igen Pulklänge unter Verwendung der Pulkdefinition (A) nach Roos (1989) (n=56)

Bild 10.11 zeigt den Vergleich der nach Bild 10.10 in Kombination mit Gleichung 10.13 geschätzten 85 %-igen Pulklänge mit der im Nomogramm von ROOS dargestellten 85 %-igen Pulklänge (vgl. Bild 2.7). Um eine Vergleichbarkeit mit den Angaben von ROOS zu gewährleisten, wurde zur Bestimmung der Pulklänge ein konstanter SV-Anteil von 10 % in Gleichung 10.13 eingesetzt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass bei einer Vorlaufstreckenlänge von 1.200 m von einer relativ guten Übereinstimmung gesprochen werden kann. Bei den beiden anderen exemplarisch dargestellten Referenzlängen 1.000 bzw. 1.800 m ergeben sich jedoch deutliche Abweichungen.

Im Gegensatz zu den anderen Kenngrößen der Pulkbildung (Pulkanzahl, Anzahl der gepulkten Fahrzeuge, Pulkanteil) konnten KIRSCH und WOLF nur einen relativ schwachen Zusammenhang zwischen der 85 %-Pulklänge nach Definition A ($PL85_A$) und der nach Pulkdefinition B ($PL85_B$) aufstellen. Auch unter Berücksichtigung des im Rahmen dieser Untersuchung identifizierten Ausreißers (s.o.) verbessert sich für die in Gleichung 10.17 dargestellte Regression das Bestimmtheitsmaß lediglich auf $R^2 = 0,468$.

Gleichung 10.17: $y_B = 0,350 y_A + 2,257$ ($R^2 = 0,468$)

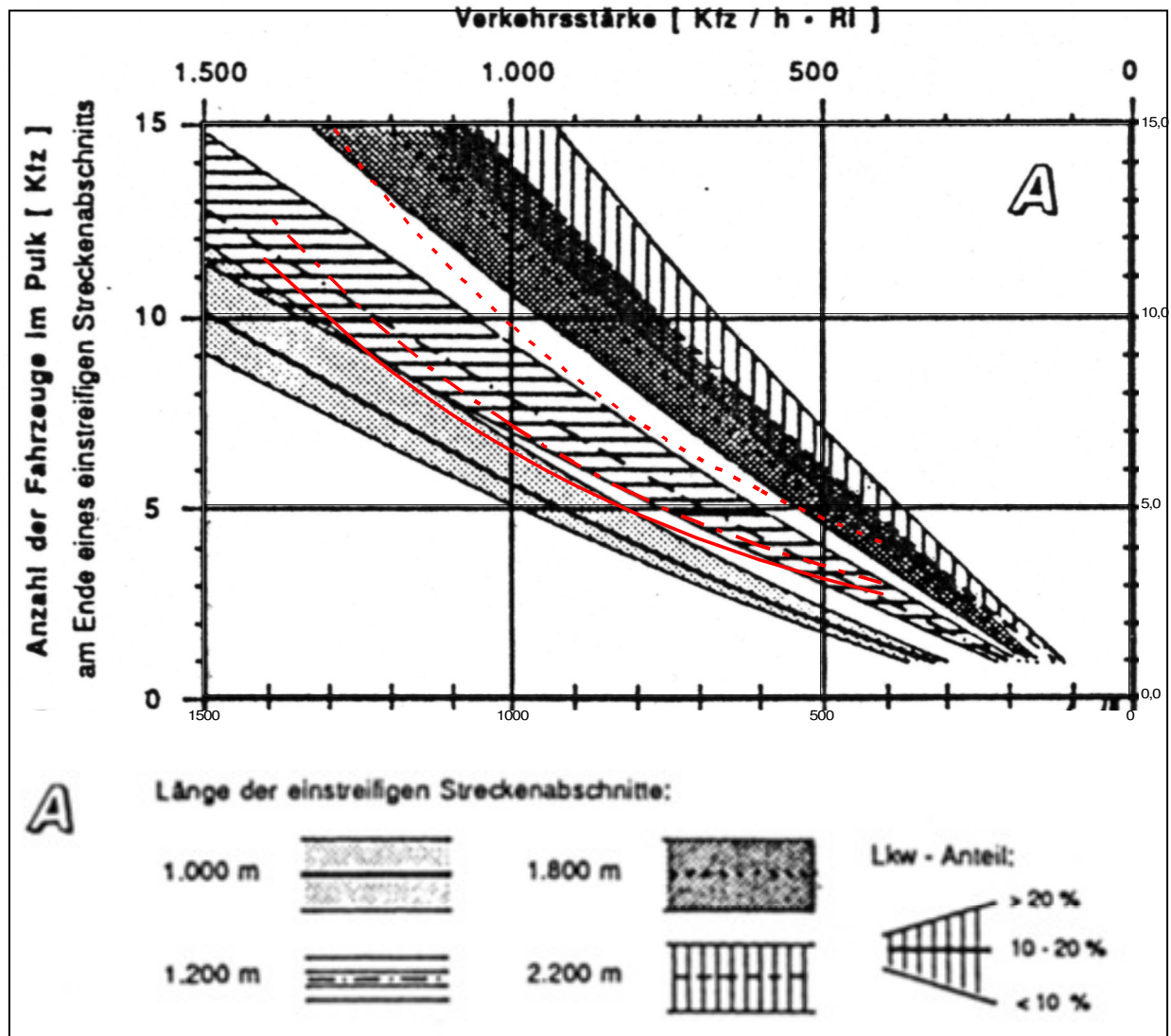


Bild 10.11: Vergleich der nach den Ergebnissen von KIRSCH und WOLFF geschätzten Pulklänge mit der im Nomogramm von ROOS dargestellten Pulklänge (vgl. Bild 2.7)

Fazit

Die Schätzung der Pulklänge stellt sich auf Basis der erhobenen und mit der Pulkdefinition B, aber auch teilweise mit der Pulkdefinition A (nach ROOS) ausgewerteten Daten als unplausibel dar. Lediglich unter Verwendung des in Bild 10.10 dargestellten Zusammenhangs zwischen der 85 %-igen Pulklänge nach Definition A und dem Pulkanteil, der seinerseits mittels der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Vorlaufstreckenlänge bestimmt werden kann, zeigt sich ein plausibles Ergebnis.

Aufgrund des schwachen Zusammenhangs zwischen den nach unterschiedlicher Pulkdefinition ermittelten Pulkängen (vgl. Gleichung 10.17) stellt sich jedoch die Frage, ob somit eine Schätzung der zur Bemessung der 2-streifigen Überholabschnitte als maßgeblich angesehenen 85 %-igen Pulklänge ausreichend genau erfolgen kann.

Bestimmung der Pulklänge

Um der Frage nach zu gehen, ob eine Schätzung der maßgebenden 85 %-igen Pulklänge gemäß der Pulkdefinition dieser Arbeit (Pulkdefinition B) ausreichend genau erfolgen kann, soll im Folgenden die modelltechnisch ermittelte der empirischen Pulklänge gegenübergestellt werden. In Analogie zur Bestimmung des Pulkanteils (vgl. Ziffer 10.4.4) findet der Vergleich mittels des Theil'schen Ungleichheitskoeffizienten (vgl. Ziffer 6.6.5) statt. Als Bewertungsmaßstab wird somit die Summe aus den prozentualen Abweichungen des Theil'schen Ungleichheitskoeffizient U und seiner drei Fehleranteilen U^M , U^S und U^C von ihrem jeweiligen Zielwert herangezogen. Das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen den beiden gegenüberzustellenden Datenreihen wird dabei auch hier indirekt über die Berechnung des Kovarianzanteils berücksichtigt.

	U	U^M	U^S	U^C
SOLL	0	0	0	1
IST	0,1095	0,0026	0,3070	0,7084
Abweichung vom SOLL [%]	11	0	31	29

Tabelle 10.3: Güte der Schätzung der Pulklänge gemäß Pulkdefinition B anhand des Theil'schen Ungleichheitskoeffizient U

Tabelle 10.3 enthält die Ergebnisse für den Ungleichheitskoeffizient U und die entsprechenden drei Fehleranteile U^M , U^S und U^C für den Vergleich der modelltechnisch ermittelten und der empirischen Pulklänge. Die für die Berechnung der Koeffizienten erforderlichen Grundlagen sind im Anhang Ziffer 8 dargestellt.

Es muss festgestellt werden, dass der Theil'sche Ungleichheitskoeffizient U zwar auf eine gute Übereinstimmung hinweist und die Mittelwerte nahezu identisch sind. Der Nicht-Effizienz Anteil U^S jedoch einen systematischen Unterschied in der Variation der ermittelten und beobachteten Werte aufdeckt.

Während sich die systematische Über- oder Unterschätzung der empirischen Werte (gekennzeichnet durch $U^M >> 0$) relativ einfach „korrigieren“ ließe (vgl. dazu FRIEDRICH, IRZIK und HOFFMANN, 2006), ist dies für den systematischen Unterschied in der Variation nur unter der Voraussetzung möglich, dass es auf Basis der zur Verfügung stehenden Informationen gelänge, eine Entscheidung darüber zu fällen, ob die modelltechnisch ermittelte Pulklänge um den Betrag der Standardabweichung zu beaufschlagen oder zu vermindern ist, um dann eine bessere Anpassung an die empirischen Pulkängen zu erreichen. Da alle Regressionen auf die Differenz zwischen den modelltechnisch ermittelten und den empirischen Pulkängen ergebnislos blieben, wird auf weitere Ausführungen verzichtet.

Fazit

Es muss schließlich festgehalten werden, dass es auf Grundlage der im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Daten nicht logisch und/oder mit einer ausreichend genauen Übereinstimmung gelungen ist, die zur Bemessung der 2-streifigen Überholabschnitte als maßgeblich angesehene 85 %-igen Pulklänge auf den Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken zu bestimmen. Die Ursache liegt u.a. in der gewählten Pulkdefinition (B) begründet.

Um die auf einer Vorlaufstrecke innerhalb einer 2+1-Strecke auftretende 85 %-ige Pulklänge gemäß der Definition von ROOS (Pulkdefinition A) zu bestimmen, stehen zwei Verfahren zur Verfügung, die jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Zum einen kann das von ROOS entwickelte Nomogramm zur Bestimmung der Pulklänge herangezogen werden (vgl. Bild 2.7). Zum anderen kann aber auch auf Bild 10.10 zurückgegriffen werden. Die Regression des Pulkanteils auf die Pulklänge wurde auf Grundlage der Rohdaten dieser Untersuchungen, jedoch unter Zugrundelegung der Pulkdefinition A, aufgestellt. Den Pulkanteil gilt es dabei in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil sowie der Vorlaufstreckenlänge zu schätzen (vgl. Gleichung 10.13).

10.5 Zusammenfassung der Analysen zur Pulkbildung

Die Betrachtung aller beobachteten Pulkängen hat gezeigt, dass **unabhängig von allen Einflüssen** 99 % aller Pulks nicht länger als 10 Fahrzeuge waren. Bezogen auf ein 30-Min-Intervall kann i.d.R. von einer maximalen 85 %-igen Pulklänge von 7 Fahrzeugen ausgegangen werden.

Als Fazit der Pulkanalyse auf Vorlaufstrecken, die sich **außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke** befinden, muss abschließend festgehalten werden, dass sich die Kenngrößen der Pulkbildung auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht oder nur relativ unbestimmt schätzen lassen. Dies liegt an der Vielzahl von Besonderheiten, die den betrachteten Vorlaufstrecken zu Überholabschnitten an Pos. 1 zu eigen sind.

Anhand der Analyse der Pulkbildung auf den Vorlaufstrecken **innerhalb einer 2+1-Strecke** in Kombination mit der Arbeit von KIRSCH und WOLFF (2005) konnte gezeigt werden, dass die Pulkdefinition eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Kenngrößen der Pulkbildung spielt. Es konnten jedoch mit Ausnahme der Pulklänge Zusammenhänge zwischen den beiden betrachteten Pulkdefinitionen insbesondere von KIRSCH und WOLFF erarbeitet werden.

Die vorliegenden Erkenntnisse von ROOS (1989) konnten durch diese und die Arbeit von KIRSCH und WOLFF weitestgehend bestätigt werden. So zeigen sich auch im Rahmen dieser Arbeit im Allgemeinen Einflüsse aus der Verkehrsstärke in Kombination mit dem SV-Anteil und der Vorlaufstreckenlänge auf die Kenngrößen der Pulkbildung. Auf Grundlage der durch diese und der Arbeit von KIRSCH und WOLFF gewonnenen Erkenntnisse wird empfohlen den **Pulkanteil** gemäß der Pulkdefinition nach ROOS zu bestimmen und dann auf den Pulkanteil gemäß der dieser Untersuchung zugrunde liegenden Pulkdefinition umzurechnen. Für die zur Bemessung der 2-streifigen Überholabschnitte als maßgeblich angesehene 85 %-igen **Pulklänge** auf den Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken muss schließlich festgehalten werden, dass es auf Grundlage der im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Daten nicht logisch und/oder mit einer ausreichend genauen Übereinstimmung gelungen ist, diese zu bestimmen. Somit fehlt eine wichtige Eingangsgröße, um anhand der Pulkauflösung die erforderliche Länge der zwei-streifigen Überholabschnitte an Pos. 1 zu ermitteln.

11 Pulkführer

Auf den 15 Untersuchungsabschnitten wurden insgesamt 3.163 Pulks erfasst. Die Anzahl der SV-Fahrzeuge, die Fahrzeugschlangen verursacht haben, betrug in dieser Zeit 1.894. Dies entspricht einem Anteil von etwa 60 % aller Pulkführer.

Untersuchungsabschnitt	Vorlaufstrecke		Anzahl und Anteil des SV an allen Pulkführern	
	q	SV-Anteil		
	[Kfz/h]	[%]	[SV-Fz]	[%]
1	454	15,0	31	88,6
2	415	4,1	14	87,5
3	242 ^(*)	10,7	14	56,0
4	359	9,5	24	96,0
5	465	9,2	26	81,3
6	767	5,5	27	81,8
7	845	4,9	38	42,2
8	675	5,5	27	60,0
9	998	5,0	47	52,8
10	876	9,0	39	49,4
11	832	8,9	43	50,6
12	1.155	11,2	74	72,5
13	496	28,2	71	95,9
14	465	8,0	28	39,4
15	782	5,9	29	31,5

(* vgl. Ziffern 6.4 und 7)

Tabelle 11.1: Anzahl und Anteil von Fahrzeugen des Schwerverkehrs an allen Pulkführern während der beobachteten Spitzenstunde

Bei der Analyse der Pulkführer nach Fahrzeugklassen (LV- bzw. SV-Fahrzeuge) konnte durch die Zweifach-Korrelation mit der Verkehrsstärke und dem SV-Anteil ein signifikanter und sehr guter Zusammenhang ($R^2 = 0,930$) zwischen der Anzahl der SV-Fahrzeuge auf der Vorlaufstrecke und der Anzahl der SV-Fahrzeuge, die als Pulkführer identifiziert wurden, nachgewiesen werden (vgl. Gleichung 11.1).

Im Gegensatz zur Anzahl konnten signifikante Zusammenhänge zwischen dem Anteil der SV-Fahrzeuge an den Pulkführern und der Verkehrsstärke sowie der Verkehrszusammensetzung nicht nachgewiesen werden. Die Streuung der Ergebnisse ist zu groß, um einen eindeutigen Trend identifizieren zu können. Auch eine Betrachtung von möglichen Einflüssen, wie beispielsweise der Länge der Vorlaufstrecke oder der Position, brachte keine Verbesserung.

Gleichung 11.1:
$$y = 0,055 \cdot x_1 + 2,273 \cdot x_2 - 21,563$$

mit:

y = Anzahl der SV-Pulkführer [Fz]

x_1 = Verkehrsstärke auf der Vorlaufstrecke [Kfz/h]

x_2 = SV-Anteil auf der Vorlaufstrecke [%]

Fazit

Anhand der Verkehrsstärke und des SV-Anteils auf der Vorlaufstrecke kann eine Schätzung der Anzahl der SV-Fahrzeuge, die als Pulkführer am Ende der Vorlaufstrecke zu erwarten sind, erfolgen.

11.1 Beginn der Pulkauflösung bei Untersuchungsabschnitten mit Fahrstreifenaddition

Roos (1989) nahm bei seinen modelltechnischen Überlegungen zur Pulkauflösung an, dass der Überholabschnitt mit einem unkritischen Wechsel auf freier Strecke, d.h. außerhalb von Knotenpunkten beginnt. Bei Untersuchungsabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, ist aber das Einscherverhalten des Pulkführers vom linken auf den rechten Fahrstreifen eine wichtige Größe für die Ermittlung der erforderlichen Länge des Überholabschnitts. Da die Pulkauflösung erst nach dem Einschern des Pulkführers beginnen kann, muss der Einscherverweg zum Überholweg des letzten Pulkfahrzeugs addiert werden.

Nachfolgende Tabelle zeigt das 0,85-Quantil für alle erfassten Einschervorgänge je Untersuchungsabschnitt.

Untersuchungsabschnitt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,85-Quantil der Einschestation [m]	200	125	150	125	125	100	125	100	100	100	200

Tabelle 11.2: Einschestation der Pulkführer an Abschnitten mit Fahrstreifenaddition

Eine Betrachtung aller Einschervorgänge von Pulkführern zu Beginn der Überholabschnitte mit Fahrstreifenaddition liefert als Ergebnis, dass in etwa 83 % aller Einschervorgänge der Pulkführer bereits nach 100 m vom linken auf den rechten Fahrstreifen gewechselt hat. Bei über 95 % aller Einschervorgänge wechselte der Pulkführer bis zu einer Entfernung von 200 m seinen Fahrstreifen.

Die Korrelationsanalyse liefert einen signifikanten und relativ guten Zusammenhang zwischen dem Einscherverweg und dem Anteil des Einfahrstroms an der Gesamtverkehrsstärke (vgl. Bild 11.1).

Vereinfacht zeigt Bild 11.1, dass bis zu einem Anteil des Einfahrstroms von etwa 20 % die 85 %-ige Einschestation bei 100 m liegt und, dass bei größeren Anteilen (bis zu 40 %) der Einscherverweg bis auf 200 m ansteigt

Fazit

Bei einem Anteil des Einfahrstroms von unter 20 % kann der Einscherverweg der Pulkführer mit 100 m angenommen werden. Bei Anteilen ab 30 % sollte ein Einscherverweg von 200 m berücksichtigt werden. Bei Anteilen zwischen 20 und 30 % erscheinen 125 bis 150 m als ausreichend.

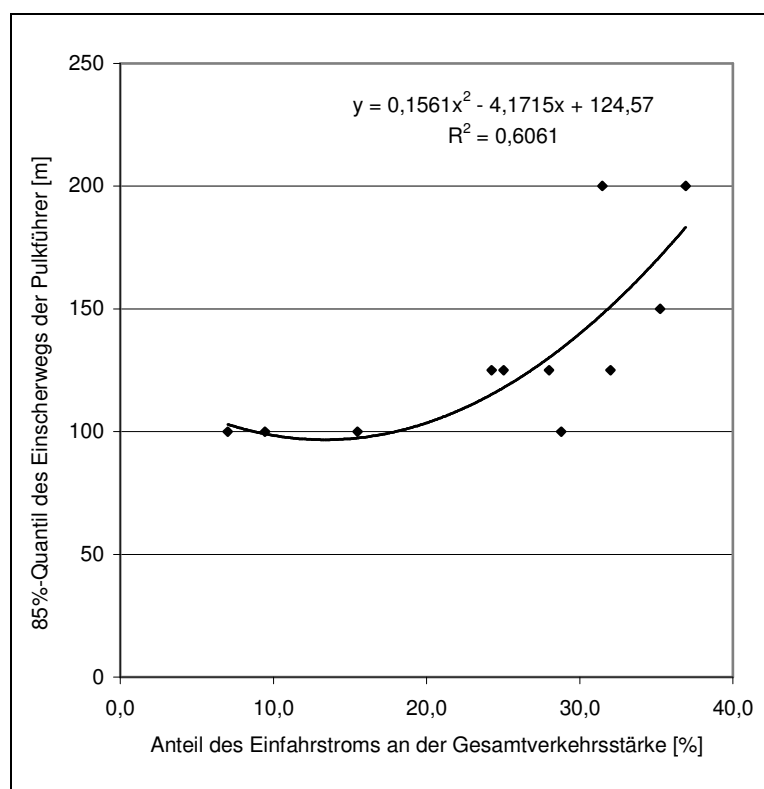


Bild 11.1: Einscherweg der Pulkführer aus dem Durchgangsstrom und Anteil des Einfahrstroms an der Gesamtverkehrsstärke (n = 11)

11.2 Beginn der Pulkauflösung bei Untersuchungsabschnitten mit unkritischem Wechsel

Im Gegensatz zur Analyse der Ein- und Ausschervorgänge (vgl. Ziffer 9) aller überholenden Fahrzeuge wurde in diesem Analyseschritt bei den Untersuchungsabschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, nur die Ausscherstation des ersten den Pulkführer überholenden Fahrzeugs erfasst.

Fazit

Bei den Untersuchungsabschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, erfolgt der Fahrstreifenwechsel des ersten den Pulkführer überholenden Fahrzeugs in 85 % aller Fälle nach spätestens 50 m.

12 Pulkauflösung

Im Zuge der Betrachtungen zur Pulkauflösung wurden bei dieser Untersuchung nur diejenigen Pulks betrachtet, die sich in den einstreifigen Vorlaufstrecken gebildet haben. Die Pulkneubildung innerhalb und vor allem am Ende der Überholabschnitte wurde hingegen nicht analysiert. Bei der Analyse wurden aufgelöste und nicht aufgelöste Pulks unterschieden.

12.1 Aufgelöste Pulks

Im Rahmen dieses Projekts konnten den verschiedenen aufgetretenen Pulkängen die entsprechenden Überholwege zugeordnet werden. Eine erste Analyse zeigt dabei eine große Streuung der Werte. Ursache für diese Streuung sind die verschiedenen Geschwindigkeitsdifferenzen

zwischen Pulkführern und überholenden Fahrzeugen, die nach ROOS (1989) zusammen mit der Pulklänge für die Pulkauflösung maßgebend sind (vgl. Ziffer 2.5.3). So streut beispielsweise an einem Untersuchungsabschnitt (hier als Beispiel gewählt: Untersuchungsabschnitt 10) der Weg zur Pulkauflösung bei einer Pulklänge von zwei Fahrzeugen zwischen 200 und 650 m.

Dieses Beispiel lässt sich auf jede beliebige Pulklänge und jeden Untersuchungsabschnitt übertragen. Dieses Beispiel und die Ergebnisse der Geschwindigkeitsanalyse (vgl. Ziffer 8.8) zeigen deutlich, dass der von ROOS (1989) gewählte Ansatz, die Bestimmung des erforderlichen Wegs zur Pulkauflösung mittels einer Geschwindigkeitsannahme jeweils für den Pulkführer bzw. die überholenden Fahrzeuge durchzuführen (vgl. Ziffer 2.5.3), mit Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein anderer Ansatz verfolgt. Hier soll die Bestimmung des erforderlichen Wegs zur Pulkauflösung mittels des Wertes erfolgen, der von 85 % aller Pulks einer bestimmten Länge zur Auflösung benötigt wird. Die unterschiedlichen vorherrschenden Geschwindigkeitsdifferenzen gehen dabei über die Streuung in die statistische Auswertung ein. Im Sinne eines praxisorientierten Verfahrens zur Bestimmung des erforderlichen Wegs zur Pulkauflösung bietet dieser Ansatz den Vorteil, dass eine Kenntnis bzw. Prognose der jeweiligen Geschwindigkeiten für Pulkführer bzw. überholende Fahrzeuge nicht erforderlich ist. In Analogie zur Pulklänge (vgl. Ziffer 10.4.5) wurde auch für den Pulkauf Lösungsweg das 0,85-Quantil als maßgebende Kenngröße gewählt, um eine Überdimensionierung zu vermeiden. Dieser als maßgebend gewählte Wert kann direkt aus den im Rahmen dieser Arbeit angepassten Box-Plots abgelesen werden (vgl. Ziffer 6.9.2).

Pulklänge	Stichprobenumfang
[Fz]	[-]
1	303
2	274
3	250
4	209
5	121
6	93
7	57
8	33
9	17
10	9
11	7
12	4
13	3
14	1
15	1
16	0
17	1
18	1

Tabelle 12.1: Stichprobenumfang zur Analyse der Pulkauflösung

Von insgesamt 1.384 Pulks wurde der Weg bis zur Pulkauflösung bestimmt. Dies entspricht etwa 44 % aller aufgetreten Pulks. Tabelle 12.1 enthält die Stichprobenumfänge für die Ermittlung des 85 %-igen Pulkauf Lösungswegs in Abhängigkeit von der Pulklänge. Während für Pulks

der Längen 1 bis 3 Fahrzeuge aufgrund ihrer hohen Vorkommenshäufigkeit lediglich eine zufällige Auswahl getroffen wurde, sind ab einer Länge von 4 Fahrzeugen alle Pulks im Rahmen der Pulkauflösung betrachtet worden.²¹

Mit Verweis auf Ziffer 6.9.2 gilt es anzumerken, dass sich die Stichprobe für die Pulklänge 2 um einen Ausreißer verringert. Bild 12.1 zeigt die Boxplots für die jeweilige Pulklänge. Bereits durch diese Darstellung wird der Anstieg des zur Pulkauflösung benötigten Weges bei längeren Pulks deutlich. Bild 12.2 enthält das Ergebnis der Regression auf den 85 %-Pulkauf Lösungsweg in Abhängigkeit von der Pulklänge. Ein logarithmischer Ansatz beschreibt den Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,847$. Ein linearer Ansatz beschreibt den Zusammenhang um etwa 15 % schlechter und überschätzt den erforderlichen Weg bei den sehr kurzen bzw. unterschätzt den erforderlichen Weg bei den mittleren Pulklängen (8-14 Kfz). Ein quadratischer Ansatz beschreibt den Zusammenhang marginal besser, liefert für sehr lange Pulks aber einen wieder abnehmenden Weg zur Pulkauflösung. Dies erscheint jedoch wenig plausibel.

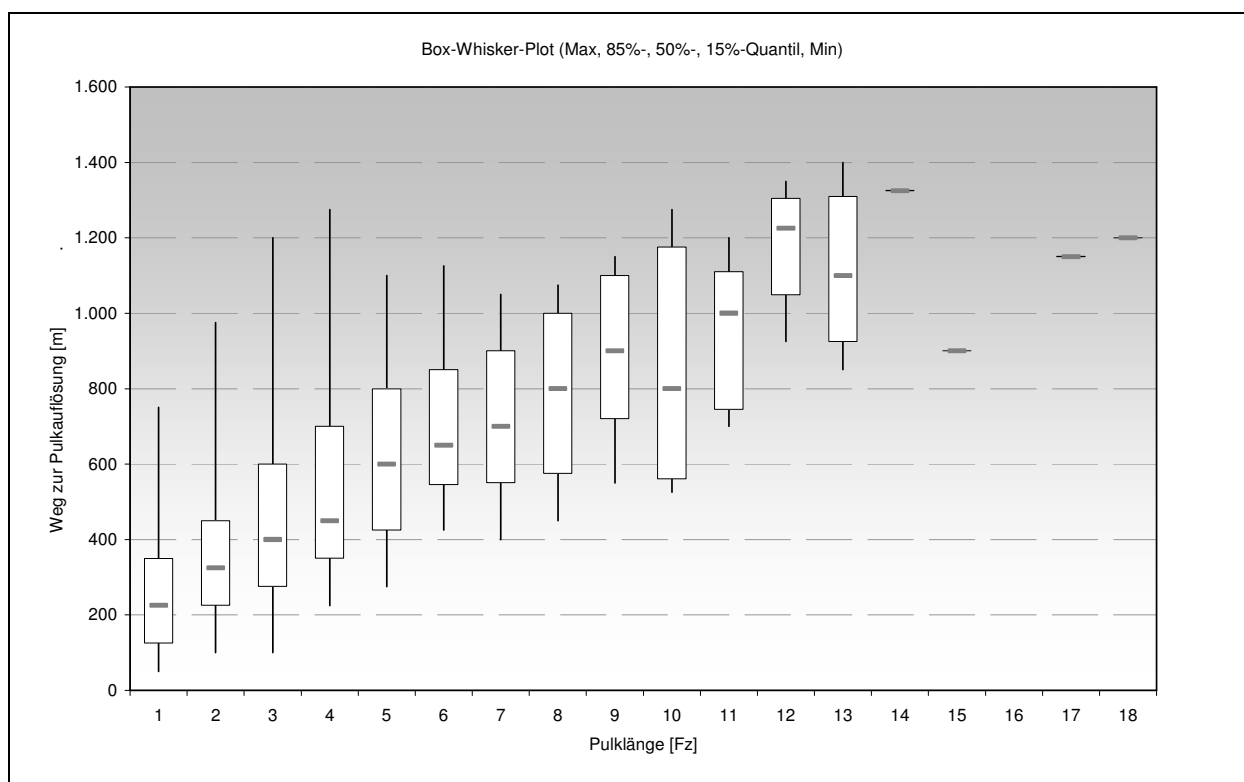


Bild 12.1: Boxplots für den benötigten Weg für die Pulkauflösung in Abhängigkeit von der Pulklänge (n=1.384)

²¹ Es fällt auf, dass der unter Ziffer 10.4.1 beschriebene längste beobachtete Pulk von 20 Fahrzeugen in Tabelle 12.1 fehlt. Dies liegt daran, dass dieser Pulk sich nicht vollständig auflösen und demnach auch kein Pulkauf Lösungsweg ermittelt werden konnte (vgl. Ziffer 12.2).

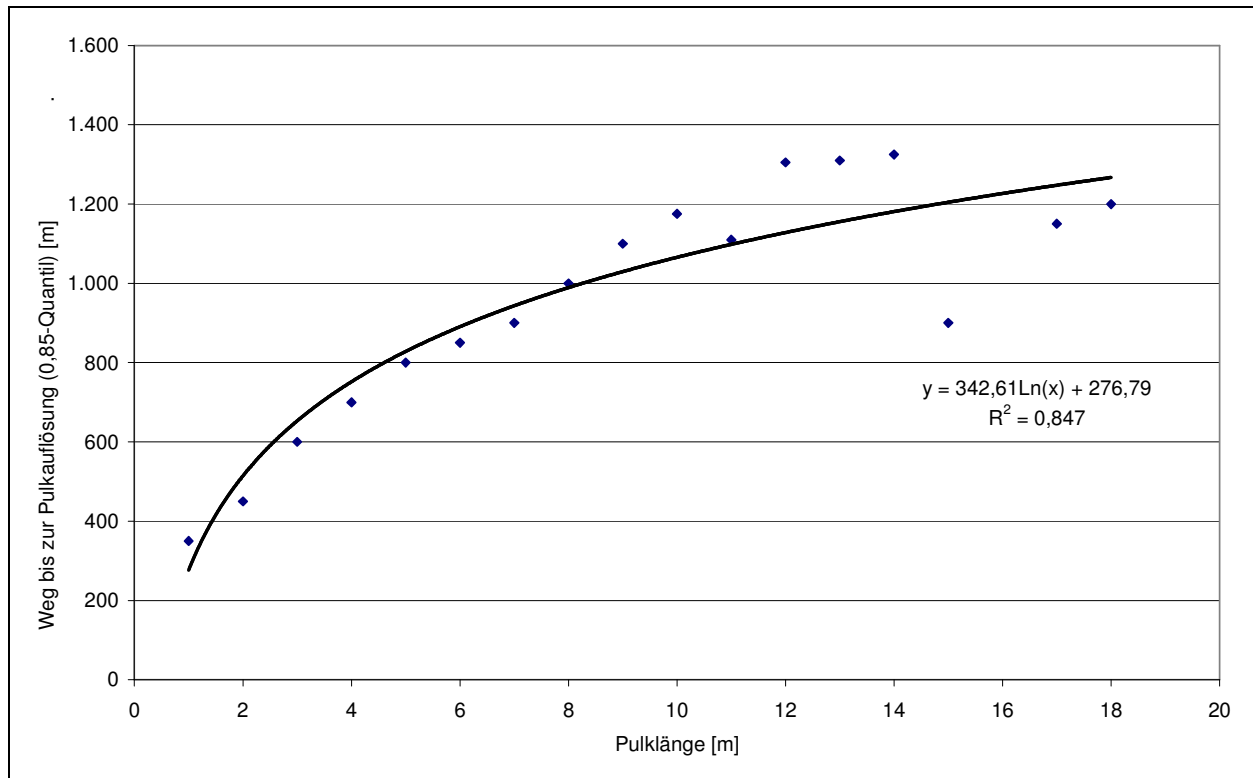


Bild 12.2: Der von 85 % der Pulks benötigte Weg für die Pulkauflösung in Abhängigkeit von der Pulklänge (n=1.384)

Im Folgenden wird der Einfluss folgender Charakteristika auf die benötigten Pulkauflösungswegen analysiert:

- (1) Ausbildung des Beginns
- (2) Position innerhalb einer 2+1-Strecke und
- (3) Abschnittslänge
- (4) Verkehrsstärke während der Spitzenstunde q_{\max}^{22}
- (5) SV-Anteil während der Spitzenstunde²²
- (6) Lkw-Überholverbot

zu (1) Ausbildung des Beginns

Anders als bei den modelltechnischen Überlegungen von ROOS (1989) zur Pulkauflösung wurden im Rahmen dieser Arbeit sowohl Überholabschnitte betrachtet, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, als auch solche mit einem unkritischen Wechsel. Die zu untersuchende Hypothese lautet, dass bei Abschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, der Weg bis zur Pulkauflösung länger ist als bei Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen, da bei diesen der Überholende nicht erst ausscheren muss (vgl. u.a. Ziffer 2.5.1). In Analogie zu Ziffer 9.2 geht die Ausbildung des Beginns als „Dummy-Variable“ in die Modellbildung ein (0=Fahrstreifenaddition, 1=unkritischer Wechsel).

zu (2) Position innerhalb einer 2+1-Strecke

²² Angemerkt werden muss, dass die Erhebungen der Pulkauflösungswegen auch außerhalb der Spitzenstunde durchgeführt wurden. Es wird jedoch in Analogie zu Ziffer 8.6 davon ausgegangen, dass die Verkehrsstärke und der SV-Anteil während der Spitzenstunde charakteristische Größen darstellen, um die Verhältnisse der Untersuchungsabschnitte untereinander abzubilden.

Die Position eines Überholabschnitts übt nach BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) einen Einfluss auf die Reisegeschwindigkeiten aus (vgl. Ziffer 8.6). Eine Vermutung lautet, dass auf Abschnitten an Pos. 1 schneller gefahren wird als auf den Abschnitten, die sich nicht an Pos. 1 befinden und demzufolge bei Abschnitten an Pos. 1 der erforderliche Weg zur Pulkauflösung bei den entsprechenden Pulkclängen kürzer sein müsste als bei den Abschnitten, die sich nicht an Pos. 1 befinden. Angemerkt werden muss jedoch, dass diese Vermutung im Rahmen der eigenen Analysen zum Geschwindigkeitsverhalten nicht nachgewiesen werden konnte. Zwar deuten die Erkenntnisse von BRANNOLTE, BASELAU und DONG auf diesen Umstand hin, jedoch ist dabei zu beachten, dass sich diese Erkenntnisse auf Reisegeschwindigkeiten und nicht auf die Geschwindigkeiten der frei fahrenden Überholenden beziehen (vgl. ebenfalls Ziffer 8.6).

zu (3) Abschnittslänge

Es wird vermutet, dass bei kürzeren Abschnitten, die Überholenden schneller fahren und somit auch der Pulkauflösungsweg kürzer ist als bei längeren Abschnitten. Es gilt jedoch zu beachten, dass diese Vermutung im Rahmen der eigenen Analysen zum Geschwindigkeitsverhalten nicht nachgewiesen werden konnte und die Erkenntnisse von BRANNOLTE, BASELAU und DONG bzgl. des Einflusses der Abschnittslänge auf die Reisegeschwindigkeiten (vgl. Ziffer 8.6) dieser Vermutung sogar eher entgegenstehen. Letzteres ist jedoch vor dem Hintergrund der unterschiedlichen „Geschwindigkeiten“ (Geschwindigkeiten der frei fahrenden Überholenden vs. Reisegeschwindigkeiten, vgl. ebenfalls Ziffer 8.6) zu sehen.

zu (4) Verkehrsstärke während der Spitzenstunde q_{\max}

Die Verkehrsstärke während der Spitzenstunde soll als Repräsentant für die Auslastung der Überholabschnitte fungieren. Aufgrund der im Fundamentaldiagramm beschriebenen Zusammenhänge zwischen der Verkehrsstärke, der Geschwindigkeit und der Verkehrsdichte steigt die Dichte bzw. die Auslastung eines Überholabschnitts mit steigender Verkehrsstärke bis zur Kapazitätsgrenze an (vgl. vor allem HBS, FGSV, 2001). Es wird unterstellt, dass umso höher die Verkehrsbelastung auf einem Überholabschnitt ist, d.h. desto höher die Dichte oder die Auslastung eines Abschnitts, desto langsamer sind die Überholenden und somit wird auch der Pulkauflösungsweg länger.

zu (5) SV-Anteil während der Spitzenstunde

Der SV-Anteil während der Spitzenstunde soll die Wahrscheinlichkeit dafür repräsentieren, dass der Anteil der „langsamen“ Überholenden zunimmt. Somit könnten sich mit steigendem SV-Anteil auch die Pulkauflösungswege verlängern. Gestützt wird diese Vermutung durch die im Rahmen der Geschwindigkeitsanalysen gewonnenen Erkenntnisse (vgl. Bild 8.4).

zu (6) Lkw-Überholverbot

Eine Vermutung könnte lauten, dass dadurch, dass nur Pkw überholen, die Wege bis zur Pulkauflösung kürzer sind als im Vergleich zu den Abschnitten, bei denen auch Lkw noch langsamere Pulkführer überholen dürfen. Ein Lkw-Überholverbot wird aus diesem Grund denn auch meist dann angeordnet, wenn eine hohe Verkehrsstärke und/oder hoher SV-Anteil vorliegt. Dieser Umstand liegt auch in der vorhandenen Datenbasis vor. Bei den Untersuchungsabschnitten, bei denen ein Lkw-Überholverbot angeordnet ist, lagen tendenziell höhere Verkehrsstärken und höhere SV-Anteile vor. Die somit bestehenden signifikanten Multikollinearitäten gilt es bei der Interpretation der Modellbildung zu berücksichtigen. In Analogie zur Ausbildung des Beginns (1) geht auch das Lkw-Überholverbot als „Dummy-Variable“ in die Modellbildung ein (0=ohne, 1=mit Lkw-Überholverbot).

Um den Einfluss der oben beschriebenen Faktoren auf die Pulkauf Lösungswege identifizieren zu können, soll die bereits mehrfach angewandte Modellreduktion zum Einsatz kommen (vgl. Ziffer 6.6.3). Die Schwierigkeit besteht hier nun darin, dass die möglichen Einflussfaktoren untersuchungsstellenabhängig sind. Somit muss für jede Untersuchungsstelle für jede Pulklänge eine ausreichend große Anzahl von Pulks vorliegen, deren Pulkauf Lösungswege im Rahmen dieser Untersuchung ermittelt werden konnte, um aus diesen (Teil-)Kollektiven dann das jeweilige 0,85-Quantil der Pulkauf Lösungswege zu bestimmen. Dies konnte lediglich für Pulks mit einer Länge von bis zu 6 Fahrzeugen gewährleistet werden. Anhang 9 enthält neben den entsprechenden Quantilswerten auch die zugrunde liegende Anzahl von verfolgten Pulks. Bei den **Untersuchungsabschnitten Nr. 2, 3, 5 und 6** konnten keine oder nur äußerst wenige Pulks insbesondere der Längen 5 oder 6 Fahrzeuge beobachtet werden. Diese Abschnitte wurden daher für die folgenden Betrachtungen ausgeschlossen.

Bei der Betrachtung von Anhang 9 fällt ggf. auf, dass bei den Pulklängen 2 bis 6 einige Untersuchungsstellen fehlen. Bei diesen lagen jeweils Unplausibilitäten vor. So ist beispielsweise bei Untersuchungsabschnitt Nr. 8 der 85 %-ige Pulkauf Lösungsweg für Pulks der Länge 6 Kfz kürzer als für Pulks der Länge 5 Kfz. Solche Unplausibilitäten finden sich auch bei weiteren Untersuchungsabschnitten. Lagen solche Unplausibilitäten vor, wurde der entsprechende Wert aus der Datenbasis entfernt. Maßgebend für die Auswahl der zu entfernenden Werte war der Rang innerhalb des jeweiligen Pulklängenclusters. So wurde beispielsweise beim Untersuchungsabschnitt Nr. 8 der Wert für Pulks der Länge 6 Kfz eliminiert, da dieser mit 800 m auf Rang 5 (Rang 1= kürzester aller in einem Pulklängencluster ermittelten 85 %-igen Pulkauf Lösungswege), die anderen Pulkauf Lösungswege jedoch erst auf den Rängen 9 bzw. 11 ihres Pulklängenclusters liegen. Weiteres Entscheidungskriterium war in Einzelfällen die zugrunde liegende Stichprobengröße.

Anhand dieser bereinigten, im Anhang 9 aufgeführten Datenbasis wurde ein Modell mit den oben genannten möglichen Einflussfaktoren aufgestellt und den entsprechenden 85 %-igen Pulkauf Lösungswegen (=Regressand) gegenübergestellt. Alle Regressoren zeigen sich dabei als signifikant ($\alpha=0,05$), größtenteils sogar hochsignifikant, um den Regressanden zu schätzen. Einzig die Konstante wäre mit einem P-Wert von 0,086 streng genommen aus dem Modell zu entfernen. Durch die Bedingung $k=0$ ergibt sich dann jedoch für die Verkehrsstärke ein P-Wert von 0,121, sodass nun dieser Regressor aus dem Modell zu entfernen wäre. Da der Einfluss der Verkehrsstärke jedoch offensichtlich ist und bei dem mit der Bedingung $k=0$ gebildeten Modell sich lediglich aufgrund bestehender Multikollinearitäten mit weiteren Regressoren als nicht zum 0,05-Niveau signifikant zeigt, wird abweichend von dem in Ziffer 6.6.4 festgelegten Signifikanzniveau für die Modellreduktionen aus Plausibilitätsgründen hier nun (ausnahmsweise) für die Konstante ein P-Wert von 0,086 als zulässig angenommen. Somit zeigt Gleichung 12.1 das Ergebnis der multiplen Regressionsanalyse zur Schätzung des erforderlichen Wegs zur Pulkauf Lösung mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,847$. Der Regressor mit der mit Abstand größten Signifikanz ist die Pulklänge (P-Wert= $7,48 \cdot 10^{-27}$).

Gleichung 12.1: ($R^2 = 0,847$)

$$y = 101,582 x_0 + 66,169 x_1 - 58,236 x_2 + 0,246 x_3 + 0,105 x_4 + 6,590 x_5 + 146,486 x_6 - 387,014$$

mit:

y =	85 %-iger Pulkauf Lösungsweg	[m]
x_0 =	Pulklänge	[Kfz]
x_1 =	Ausbildung des Beginns (0=FS-Addition, 1=unkrit. Wechsel)	[-]
x_2 =	(absolute) Position des Überholabschnitts	[-]
x_3 =	Länge des Überholabschnitts	[m]
x_4 =	Verkehrsstärke während der Spitzenstunde q_{\max}	[Kfz/h]
x_5 =	SV-Anteil während der Spitzenstunde	[%]
x_6 =	Lkw-Überholverbot (0=ohne; 1=mit)	[-]

Wie auch alle anderen im Rahmen dieser Untersuchung aufgestellten Modelle, sagt auch Gleichung 12.1 streng genommen nichts über die Auswirkungen der einzelnen Einflussfaktoren aus. Das Modell beschreibt lediglich die zugrunde liegende Datenbasis. Wie bereits aufgezeigt, gilt es etwaige Multikollinearitäten bei der Interpretation von Gleichung 12.1 zu berücksichtigen. Neben den bereits oben beschriebenen Zusammenhängen mit dem Lkw-Überholverbot bestehen in der vorliegenden Datenbasis weitere Multikollinearitäten zwischen

- der Position und der Länge. Die Abschnitte an hinterer Position sind tendenziell kürzer (vgl. z.B. Tabelle 3.1).
- der Position und dem SV-Anteil. Dadurch dass der höchste SV-Anteil zufällig in dem Abschnitt vorliegt, der sich an hinterster Position (hier: 4) befindet, liegt in der vorliegenden Datenbasis ein signifikanter Zusammenhang in der Art vor, dass tendenziell bei den Abschnitten an den vorderen Positionen ein niedrigerer SV-Anteil vorherrscht.
- der Verkehrsstärke und dem SV-Anteil. Abschnitte mit vergleichsweise hoher Verkehrsbelastung weisen tendenziell einen niedrigeren SV-Anteil auf.
- der Länge und der Verkehrsstärke. Längere Überholabschnitte sind in der vorliegenden Datenbasis tendenziell geringer belastet als kürzere Abschnitte.

Welche Bedeutung haben nun diese Multikollinearitäten für die Interpretation von Gleichung 12.1? Das Modell zeigt beispielsweise für ein Lkw-Überholverbot, dass aufgrund des Umstands, dass Lkw-Überholverbote bei höheren Verkehrsstärken und/oder SV-Anteilen angeordnet sind, sich der Effekt einstellt, dass die Anordnung eines Lkw-Überholverbots zu einem um etwa 150 m längerem Pulkauf Lösungsweg führt. Ein solcher Mit/Ohne-Vergleich ist jedoch für das Lkw-Überholverbot aufgrund der bestehenden Multikollinearitäten nicht zulässig. Das in Gleichung 12.1 aufgeführte Modell beschreibt somit nicht die Auswirkung eines Lkw-Überholverbots, sondern lediglich die zugrunde liegende Datenbasis, die sich im vorliegenden Fall derart darstellt, dass bei den hochbelasteten, mit einem verhältnismäßig hohen SV-Anteil und aus diesen Gründen mit einem Lkw-Überholverbot versehenen Abschnitten die Pulkauf Lösungswege deutlich länger sind als bei den niedriger belasteten, mit geringeren SV-Anteilen und keinem angeordnetem Lkw-Überholverbot.

Weiterhin zeigt das Modell, dass bei den Abschnitten, die sich an den vorderen Positionen befinden, die Pulkauf Lösungswege länger sind als bei denen, die weiter hinten in der 2+1-Strecke angeordnet sind. Dieses Ergebnis widerspricht der Vermutung, dass auf Abschnitten an Pos. 1 schneller gefahren wird als auf den Abschnitten, die sich nicht an Pos. 1 befinden und demzufolge bei diesen der erforderliche Weg zur Pulkauf Lösung bei den entsprechenden Pulklängen

länger sein müsste als bei den Abschnitten, die sich an Pos. 1 befinden. Da Abschnitte an vorderer Position tendenziell einen vergleichsweise geringen SV-Anteil aufweisen (Multikollinearität), müssten auch aus diesem Grund hier die Pulkauflösungswege kürzer sein als bei den Abschnitten an hinterer Position (vgl. (5)). Da jedoch Abschnitte an vorderer Position auch tendenziell länger sind (Multikollinearität), sind hier aus dieser Ursache heraus die Pulkauflösungswege länger als bei den hinteren Abschnitten (vgl. (3)). Offensichtlich dominiert der Einfluss der Länge gegenüber dem aus dem SV-Anteil. Dies wird auch durch die Betrachtung der Signifikanz anhand des P-Wertes deutlich. Demnach ist die Länge mehr als 10mal so signifikant erforderlich den Regressanden zu schätzen als der SV-Anteil. Da jedoch weder bzgl. des Einflusses der Position auf das Geschwindigkeitsniveau der Überholenden noch auf das der Pulkführer Erkenntnisse im Rahmen dieser Untersuchung gewonnen werden konnten und auch die Literatur lediglich anhand von Reisezeitmessungen den Einfluss der Position beschreibt, bleibt ungeklärt, ob sich der im Modell enthaltene Effekt durch die Multikollinearität mit der Länge einstellt oder nicht doch auf dem Umstand basiert, dass bei Abschnitten an Pos. 1 geringere Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Überholenden und den Pulkführern vorliegen als bei den Abschnitten, die nicht an Pos. 1 liegen.

Im Hinblick auf die Plausibilität des in Gleichung 12.1 enthaltenen Modells lässt sich jedoch für die übrigen Regressoren feststellen, dass

- mit zunehmender Pulklänge (0) der erforderliche Weg bis zur Pulkauflösung länger wird. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Literatur (vgl. vor allem ROOS) sowie den Betrachtungen zum einfachen Zusammenhang zwischen der Pulklänge und dem Pulkauf Lösungsweg (vgl. Bild 12.2).
- bei Abschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, der Weg bis zur Pulkauf Lösung länger ist als bei Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen (1). Dies entspricht dem erwarteten Effekt.
- bei kürzeren Abschnitten (3) die Pulkauf Lösungswege kürzer sind und dies, obwohl kürzere Abschnitte tendenziell eher an hinterer Position liegen und höher belastet sind als längere Abschnitte, d.h. demnach die Pulkauf Lösungswege bei kürzeren Abschnitten aufgrund der vorliegenden Multikollinearitäten auch länger sein könnten. Der im Modell abgebildete Effekt der Abschnittslänge ist trotz der bestehenden Multikollinearitäten plausibel.
- mit steigender Verkehrsbelastung (4) auch die Pulkauf Lösungswege länger werden und dies, obwohl höher belastete Überholabschnitte in der vorliegenden Datenbasis tendenziell kürzer sind und einen vergleichsweise geringen SV-Anteil aufweisen, d.h. demnach die Pulkauf Lösungswege bei höher belasteten Abschnitten aufgrund der vorliegenden Multikollinearitäten auch kürzer sein könnten. Trotz dieser Multikollinearitäten ist der im Modell enthaltene Effekt für die Verkehrsstärke plausibel.
- sich mit steigendem SV-Anteil (5) der erforderliche Pulkauf Lösungsweg trotz der bereits aufgeführten Multikollinearitäten verlängert. Dieses Ergebnis spiegelt die Erkenntnisse aus den Geschwindigkeitsanalysen wider, dass bei einer Zunahme des SV-Anteils die mittlere Geschwindigkeit der Überholenden sinkt (vgl. Bild 8.4). Dadurch werden auch die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Überholenden und den Pulkführern geringer, was wiederum zu längeren Pulkauf Lösungswegen führt.

Fazit

Mit Gleichung 12.1 kann der erforderliche Weg zur Pulkauflösung plausibel geschätzt werden. Es gilt jedoch die Randbedingung, dass auf hochbelasteten Abschnitten mit einem verhältnismäßig hohen SV-Anteil ein Lkw-Überholverbot angeordnet sein muss. Des Weiteren gilt es zu beachten, dass der Einfluss der Position abschließend nicht eindeutig geklärt werden konnte.

Voraussetzung für die Anwendung von Gleichung 12.1 ist die Kenntnis über die zu erwartenden Pulkängen. Diese Abschätzung hat sich jedoch insbesondere für die Vorlaufstrecken, die sich außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke befinden, als äußerst schwierig im Zuge der Analysen zur Pulkbildung gezeigt (vgl. Ziffer 10.5).

Weiterhin gilt es zu beachten, dass anhand von Gleichung 12.1 lediglich die Schätzung des von 85 % der Pulks einer Länge nicht überschrittenen Wegs bis zur Pulkauflösung erfolgen kann. Dies bedeutet zum einen, dass immerhin 15 % aller Pulks einer Länge einen längeren Weg benötigen. Zum anderen würden die Pulks, bei denen keine vollständige Pulkauflösung stattfand, in dem Modell keine Berücksichtigung finden. An diesem Defizit im Hinblick auf die Bestimmung des zur Pulkauflösung erforderlichen Weges würde auch die Verwendung eines konstanten Wertes für die Pulklänge in Gleichung 12.1 nichts ändern.

12.2 Nicht aufgelöste Pulks

Wurden bei den bisherigen Ausführungen zur Pulkauflösung lediglich die Pulks betrachtet, die auch vollständig aufgelöst wurden, sollen im Folgenden auch die Pulks betrachtet werden, die sich in der Vorlaufstrecke gebildet und sich dann im anschließenden Überholabschnitt nicht vollständig aufgelöst haben. Mittels dieser Vorgehensweise soll dem im Fazit zur Ziffer 12.1 beschriebenen Nachteil bei der Bestimmung des erforderlichen Pulkauf Lösungswegs auf Grundlage der aufgelösten Pulks entgegengewirkt werden.

Es muss jedoch festgestellt werden, dass lediglich an 6 der 15 Untersuchungsabschnitte Pulks auftraten, die nicht aufgelöst wurden. Der Anteil der nicht aufgelösten Pulks an allen 3.163 beobachteten Pulks beträgt somit lediglich 2,6 %. Bezogen auf das Kollektiv der 6 Untersuchungsabschnitte mit nicht aufgelösten Pulks beträgt der Anteil ca. 5 %. Je nach Untersuchungsabschnitt variiert er dabei allerdings zwischen 1,6 und 10,8 %. Tabelle 12.2 zeigt u.a., dass nicht aufgelöste Pulks nur an solchen Untersuchungsabschnitten auftraten, bei denen die max. Verkehrsstärke (q_{\max}) über 900 Kfz/h betrug.

Da die Anzahl der nicht aufgelösten Pulks schon allein aufgrund der unterschiedlichen Auswerteziträume differenziert, wird im Folgenden der Anteil an nicht aufgelösten Pulks betrachtet. Da beim **Untersuchungsabschnitt 3** die schlechten Witterungsverhältnisse während des Untersuchungszeitraums keine vollständige Auswertung der Pulkführer zuließen (vgl. Ziffer 6.4), wurde dieser Abschnitt aus den folgenden Analysen ausgeschlossen.

Untersuchungsabschnitt	Auswertezeitraum	q _{max}	nicht aufgelöste Pulks	
			Anzahl	Anteil
	[h]	[Kfz/h]	[-]	[%]
1	3,0	752	0	0,0
2	4,0	546	0	0,0
3	2,0	623 ^(*)	0	0,0
4	4,0	483	0	0,0
5	4,0	622	0	0,0
6	4,0	821	0	0,0
7	4,0	1.293	37	10,8
8	4,0	992	8	4,5
9	3,5	1.162	4	1,6
10	4,0	962	9	2,9
11	4,0	1.159	8	3,1
12	3,5	1.155	17	4,9
13	3,5	496	0	0,0
14	4,0	465	0	0,0
15	4,0	782	0	0,0

(* vgl. Ziffern 6.4 und 7)

Tabelle 12.2: Anzahl und Anteil der nicht aufgelösten Pulks

Mittels Modellreduktionen (vgl. Ziffer 6.6.4) werden die auch in Ziffer 12.1 als mögliche Einflussfaktoren auf die Pulkauflösungswege der aufgelösten Pulks betrachteten Regressoren hinsichtlich ihrer Signifikanz getestet. Es zeigt sich, dass der Anteil der nicht aufgelösten Pulks maßgeblich von der Verkehrsstärke und von der Abschnittslänge abhängt. Die übrigen Regressoren zeigten sich bei allen getesteten Kombinationen als nicht signifikant ($\alpha=0,05$). Im Hinblick auf die Multikollinearität der betrachteten Regressoren ist festzustellen, dass lediglich zwischen den beiden signifikanten Regressoren (q_{max} und L) und dem Lkw-Überholverbot signifikante Korrelationen bestehen. Während tendenziell bei den hochbelasteten Abschnitten ein Lkw-Überholverbot angeordnet ist, gilt dies auch für die kürzeren Überholabschnitte. Somit kann ein Einfluss aus einem Lkw-Überholverbot nicht ausgeschlossen werden.

Der zweifach-lineare Ansatz mit der Verkehrsstärke und der Abschnittslänge schätzt den Anteil der nicht aufgelösten Pulks mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,721$. Nach der Länge des Überholabschnitts aufgelöst ergibt sich Gleichung 12.2:

Gleichung 12.2: $y = 2,237 x_1 - 297,932 x_2$ ($R^2=0,721$)

mit:

$$\begin{aligned}
 y &= \text{Länge des Überholabschnitts} && [\text{m}] \\
 x_1 &= q_{\text{max}} && [\text{Kfz/h}] \\
 x_2 &= \text{Anteil der nicht aufgelösten Pulks an allen Pulks} && [\%]
 \end{aligned}$$

Eine der zentralen Aufgaben von 2+1-Strecken besteht darin, dass die in der Vorlaufstrecke gebildeten Pulks aufgelöst werden sollen. Der Anteil der nicht aufgelösten Pulks sollte daher „0“ betragen. Denkbar ist aber auch, dass der Anteil der nicht aufgelösten Pulks als ein Qualitätsmaßstab festgelegt wird. Bild 12.3 zeigt den Zusammenhang zwischen der maximalen Verkehrsstärke und der erforderlichen Länge eines Überholabschnitts bei verschiedenen Qualitätsansprüchen im Hinblick auf den Anteil nicht aufgelöster Pulks.

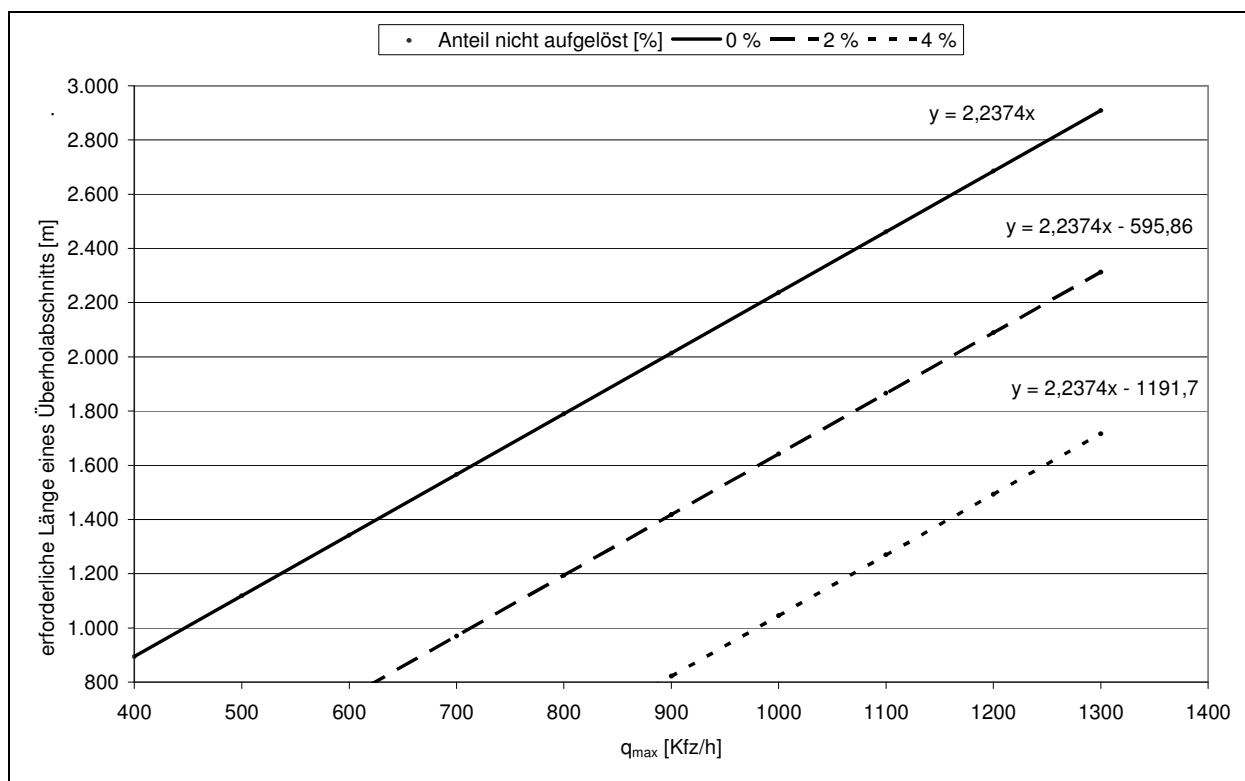


Bild 12.3: Ermittlung der erforderlichen Länge von Überholabschnitten in Abhängigkeit verschiedener Qualitätsansprüche im Hinblick auf den Anteil nicht aufgelöster Pulks

Fazit

Die Bestimmung der erforderlichen Länge eines Überholabschnitts kann in Abhängigkeit eines Qualitätsniveaus und der Verkehrsstärke während der Spitzenstunde vorgenommen werden.

Da Verkehrsstärken unter 400 Kfz/h und Überholabschnitte kürzer als 800 m im Rahmen der Untersuchung nicht betrachtet wurden und auch außerhalb des in der RAS-Q 96 (FGSV, 1996) definierten Einsatzbereichs für 2+1-Strecken liegen, begrenzen diese beiden Werte den Gültigkeitsbereich für den Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der erforderlichen Länge eines Überholabschnitts.

Des Weiteren ist zu beachten, dass bei höher belasteten sowie kürzeren Abschnitten ein Lkw-Überholverbot angeordnet sein muss, um das Modell anzuwenden.

12.3 Zusammenfassung der Analysen zur Pulkauflösung

Als maßgebender Pulkauf Lösungsweg wird der von 85 % der Pulks einer Pulklänge benötigte Weg bis zur Pulkauf Lösung angesehen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte ein Modell entwickelt werden, mit dem der erforderliche Weg zur Pulkauf Lösung plausibel geschätzt werden kann. Es gilt jedoch die Randbedingung, dass auf hochbelasteten Abschnitten mit einem verhältnismäßig hohen SV-Anteil ein Lkw-Überholverbot angeordnet sein muss. Neben dem Aspekt, dass der Einfluss der Position nicht eindeutig geklärt werden konnte, gilt es des Weiteren zu beachten, dass dieses Verfahren jedoch einige Defizite aufweist. Kritisch ist bei diesem Verfahren, dass Pulks, die sich nicht auflösen konnten, nicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus beinhaltet die Bildung des 85 %-igen Pulkauf Lösungswegs noch weitere Unsicherheiten im Hinblick auf die

Bestimmung der erforderlichen Abschnittslänge zur Pulkauflösung, da 15 % der Pulks einer Pulklänge einen längeren als den 85 %-igen Pulkauf Lösungsweg zur Pulkauf Lösung benötigen.

Es wurde daher auch ein anderer Weg verfolgt, bei dem die Bestimmung der erforderlichen Länge eines Überholabschnitts in Abhängigkeit eines Qualitätsniveaus für den Anteil an nicht aufgelösten Pulks und der Verkehrsstärke während der Spitzenstunde vorgenommen werden kann.

Zu beachten ist dabei, dass nicht vollständig aufgelöste Pulks nicht bei allen Untersuchungsabschnitten auftraten. Dies hängt mit der bei teilweise geringen Verkehrsstärken vorhandenen Überdimensionierung der betrachteten Untersuchungsabschnitte zusammen.

13 Bestimmung der optimalen Länge von Überholabschnitten

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden verschiedene Ansätze betrachtet, um die erforderliche Länge eines Überholabschnitts bestimmen zu können. Dabei zeigte sich bei der Analyse der Pulkbildung, dass die zur Bemessung der 2-streifigen Überholabschnitte als maßgeblich angesehene 85 %-igen Pulklänge auf den Vorlaufstrecken außerhalb als auch innerhalb von 2+1-Strecken nicht auf Grundlage der im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Daten logisch und/oder mit einer ausreichend genauen Übereinstimmung bestimmt werden kann. Des Weiteren weist jedoch auch das Verfahren zur Bestimmung der erforderlichen Abschnittslänge anhand der empirisch beobachteten Pulkauf Lösungswege einige Schwachpunkte auf. Dieses Verfahren basierte im Grundsatz auf den modelltechnischen Überlegungen von ROOS (1989) und hat den entscheidenden Nachteil, dass die nicht aufgelösten Pulks keine Berücksichtigung finden. Des Weiteren müssen bei diesem Verfahren einige Einflüsse berücksichtigt werden, die sich aus der Ausbildung des Beginns, der (absoluten) Position oder der Länge der Überholabschnitte sowie der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und u.U. einem Lkw-Überholverbot ergeben. Dies macht das Verfahren deutlich diffiziler.

Losgelöst von dem Verfahren nach ROOS wurde daher ein weiterer Ansatz verfolgt, der zusätzlich wesentlich einfacher zu handhabenden ist. Hierbei wird der Anteil der nicht aufgelösten Pulks als Qualitätsmaßstab für die Bestimmung der erforderlichen Länge eines Überholabschnitts herangezogen.

Bei der Analyse der Pulkauf Lösung wurden auf einzelnen Untersuchungsabschnitten Pulks beobachtet, für die die vorhandenen Abschnittslängen für eine vollständige Pulkauf Lösung nicht ausreichten. Bezogen auf die Gesamtanzahl aller Pulks während der Beobachtungszeiträume erhält man den Anteil an nicht aufgelösten Pulks. Dieser Anteil hängt vor allem von der Verkehrsstärke, aber auch von der Abschnittslänge ab. Anhand dieses Zusammenhangs kann bei einer Festlegung eines Anspruchsniveaus für den Anteil nicht aufgelöster Pulks die erforderliche Abschnittslänge in Abhängigkeit der Verkehrsstärke bestimmt werden.

Einflüsse aus der Länge oder der Position der Überholabschnitte, sind bei diesem Verfahren impliziert. Da nicht aufgelöste Pulks bis auf eine Ausnahme nur an Untersuchungsabschnitten mit Fahrstreifenaddition auftraten, braucht der Einscherweg der Pulkführer nicht mehr explizit durch einen Zuschlag auf den Pulkauf Lösungsweg berücksichtigt werden. Aufgrund der Erkenntnisse zum Einscherverhalten der Pulkführer (vgl. Ziffer 11.1) erscheint jedoch eine Anpassung der erforderlichen Abschnittslänge bei einem Beginn mit einem unkritischen Wechsel durch einen Abschlag zulässig. Da bei den Abschnitten mit nicht aufgelösten Pulks die Pulkführer i.d.R. nach 125 m eingeschert waren, kann dieser Abschlag bis zu 75 m betragen.

Durch die Gegenüberstellung der Kenngrößen der Pulkbildung mit den sicherheitsrelevanten Kenngrößen „Sperrflächenüberfahrten am Ende“ (vgl. Ziffer 9.3.4) bzw. „Summe der (gewichteten) Konflikte“ (vgl. Ziffer 9.4) ließen sich keine Hinweise auf einen z.B. maximalen Pulkanteil ableiten, der unter Sicherheitsaspekten als zu vermeiden anzusehen ist. Im Hinblick auf die Ermittlung einer optimalen Länge von Überholabschnitten wurde daher auf die erarbeiteten Erkenntnisse zur Pulkbildung auf Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken zurückgegriffen. Hier hatte sich u.a. gezeigt, dass ab einem Pulkanteil von 75 % (nach Pulkdefinition A; entspricht 34,5 % nach Pulkdefinition B) Pulks mit mind. 7 Fahrzeugen in einem Pulk zu erwarten sind (vgl. Bild 10.10). Mit Blick auf Bild 12.1 wird deutlich, dass bei einer Pulklänge von 7 Fahrzeugen 15 % aller Pulks dieser Länge über 900 m benötigt haben, bis sie aufgelöst waren. Von den insgesamt 1.384 Pulks, deren Weg bis zur Pulkauflösung bestimmt wurde, benötigten jedoch 95 % weniger als 900 m zur Pulkauflösung. Weiterhin hat die Häufigkeitsverteilung der 85 %-Pulkängen (vgl. Bild 10.2) gezeigt, dass unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Vorlaufstrecke Nr. 8 (Mehrzweckstreifen, vgl. Ziffer 8.1) von einer maximalen 85 %-igen Pulklänge von 7 Fahrzeugen ausgegangen werden kann. Beide Aspekte zusammengefasst führen zu dem Vorschlag, Pulkängen über 7 Fahrzeugen bzw. die entsprechenden Pulkanteile durch eine Begrenzung der Länge einer Vorlaufstrecke und dementsprechend der Länge des Überholabschnitts in der Gegenrichtung zu vermeiden.

Mittels Gleichung 10.13, mit der der Pulkanteil in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke, dem SV-Anteil und der Länge der Vorlaufstrecke geschätzt wird, lässt sich mit $L_{\text{Ü}} = L_{\text{Vorlauf}} + X$ (mit $X=400$ m bei Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition in einem teilplanfreien Knotenpunkt beginnen bzw. $X=200$ m bei Abschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, vgl. Bild 2.4) eine maximale Länge eines Überholabschnitts bestimmen.

Aufgrund der in Gleichung 10.13 enthaltenen Effekte führt ein ansteigender SV-Anteil zu einer geringer werdenden maximalen Länge (vgl. Bild 14.1). Dies bedeutet, dass bei höheren SV-Anteilen mehrere kürzere Abschnitte wenigen Längeren vorzuziehen sind. Dies entspricht prinzipiell auch den aus den Ergebnissen der Projektgruppe „Zwischenquerschnitte“ (BRANNOLTE ET. AL., 1992) abgeleiteten Empfehlungen der RAS-Q 96 (FGSV, 1996) zur optimalen Länge (vgl. Ziffer 2.2).

14 Empfehlungen

14.1 Allgemeines

Zunächst werden die neuen, auf Basis der nun vorliegenden Arbeit gewonnen Empfehlungen hinsichtlich der Bestimmung der optimalen Länge eines Überholabschnitts im Zuge einer 2+1-Strecke aufgeführt. Anschließend erfolgen noch Hinweise zur Querschnittsgestaltung und Empfehlungen zur Knotenpunktart, die sich teilweise auf zurückliegenden Arbeiten gründen, jedoch auch im Rahmen dieser Dissertation auf der Grundlage vorhandener Untersuchungen erarbeitet wurden.

14.2 Ermittlung der optimalen Länge eines Überholabschnitts

Als wesentlichen Beitrag zum Erkenntnisfortschritt konnte im Rahmen dieser Arbeit ein praxisorientiertes Verfahren zur Ermittlung der **optimalen Länge** eines Überholabschnitts im Zuge von 2+1-Strecken erarbeitet werden. Im Gegensatz zu dem aus der Literatur (vgl. ROOS, 1989) bekannten Verfahren zur Ermittlung einer im Hinblick auf die Pulkauflösung **erforderlichen Länge** enthält das nachfolgend beschriebene Verfahren auch Empfehlungen hinsichtlich einer

aus Sicherheitsüberlegungen abgeleiteten Mindestlänge sowie einer Obergrenze, um eine übermäßige Pulkbildung in der Gegenrichtung zu vermeiden. Das neu entwickelte Verfahren gründet sich dabei nicht auf modelltechnischen Überlegungen, sondern wurde auf Basis umfangreicher empirischer Untersuchungen sowie anhand von Korrelations- und Regressionsanalysen entwickelt. Zusammen mit dem durch BRANNOLTE, BASELAU und DONG (2004) bzw. BASELAU (2006) entwickelten Verfahren zur Beurteilung der Verkehrsqualität auf Straßen mit 2+1-Verkehrsführung stehen dem Verkehrsplaner somit zwei hilfreiche Werkzeuge für die Planung von 2+1-Strecken zur Verfügung. Während das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren dabei der (Vor-)Planung dient, um die Abschnittslängen festzulegen, kann mit dem von BRANNOLTE, BASELAU und DONG bzw. BASELAU erarbeiteten Verfahren die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs auf 2+1-Strecken erfolgen.

Für die Anwendung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahrens sind einige Randbedingungen zu beachten, da bei der Auswahl der Untersuchungsabschnitte darauf Wert gelegt wurde, eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Überholabschnitte im Hinblick auf eine gesicherte Bestimmung der erforderlichen Länge von Überholabschnitten zu gewährleisten. Einflüsse aus den festgelegten konstanten entwurfstechnischen und betrieblichen Charakteristika können daher aufgrund der Auswahl der Untersuchungsabschnitte nicht untersucht werden.

Der neue Ansatz zur Bestimmung der optimalen Länge eines Überholabschnitts gilt daher nur für 2+1-Strecken,

1. die als Kraftfahrstraßen betrieben werden,
2. bei denen die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 100 km/h beschränkt ist,
3. bei denen nur teilplanfreie Knotenpunkte angeordnet sind,
4. die Längsneigung gering ist ($\pm 2\%$),
5. die Kurvigkeit gering ist und
6. bei denen bei höheren Verkehrsstärken und gleichzeitig höheren SV-Anteilen ein Lkw-Überholverbot angeordnet ist.

Verkehrsstärken unter 400 Kfz pro Stunde und Richtung und Längen kürzer 800 m wurden im Rahmen der Untersuchung nicht betrachtet und liegen auch außerhalb des in der RAS-Q 96 (FGSV, 1996) definierten Einsatzbereichs von 2+1-Strecken. Als obere Grenze ist eine Verkehrsstärke von 1.300 Kfz pro Stunde und Richtung zu beachten.

Im Hinblick auf ein praxisorientiertes Verfahren zur Ermittlung der optimalen Länge eines Überholabschnitts wird die Festlegung eines Qualitätsmaßstabs für den Anteil an nicht aufgelösten Pulks vorgeschlagen (vgl. Ziffer 13). Bild 14.1 zeigt die zulässigen bzw. empfohlenen Längen für Überholabschnitte in Abhängigkeit von

- der Verkehrsstärke,
- der Lage innerhalb der 2+1-Strecke (Pos.),
- dem SV-Anteil und
- dem Anteil an nicht aufgelösten Pulks.

Für die Bestimmung der aus Sicherheitsüberlegungen abgeleiteten minimalen Länge eines Überholabschnitts (vgl. Gleichung 9.4) wird ein Anteil von Einscherern am Ende von 32,5 % als kritisch und somit als zu vermeiden eingestuft. Diese Festlegung begründet sich daraus, dass zwar erst ab Anteilen von über 45 % vermehrt (gewichtete) Konflikte pro Kraftfahrzeug beobachtet werden mussten (vgl. Bild 9.7), jedoch der Bereich zwischen 20 % und 45 % durch die Untersuchung nicht abgedeckt wurde. Bei einem Anteil von Einscherern am Ende von 32,5 %

ist (modelltechnisch) mit einer (gewichteten) Anzahl von 0,036 Konflikten in 30 Minuten pro Kraftfahrzeug zu rechnen. Dieser Grenzwert wird als zulässig eingeschätzt, da bei etwa einem Drittel der 21 betrachteten 30 Minutenintervalle weniger (gewichtete) Konflikte in 30 Minuten pro Kraftfahrzeug auftraten.

Die Bestimmung der erforderlichen Länge für einen Überholabschnitt, unter der Maßgabe, dass sich alle in den Überholabschnitt einfahrenden Pulks auflösen können (Anteil nicht aufgelöster Pulks = 0 %), erfolgt auf Basis der in Ziffer 12.2 erarbeiteten Zusammenhänge.

Mit Hinweis auf Ziffer 13 gilt es jedoch die Länge von Überholabschnitten im Hinblick auf die Pulkbildung auf den einstreifigen Abschnitten der Gegenrichtung zu begrenzen. Als „zu vermeiden“ wird ein Pulkanteil von 75 % gemäß der Pulkdefinition (A) nach Roos bzw. 34,5 % gemäß der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Pulkdefinition (B) empfohlen. Bei einem solchen Pulkanteil sind Pulkängen von mehr als 7 Fahrzeugen zu erwarten. Die Untersuchung hat jedoch gezeigt, dass Pulks derartiger Länge nur selten auftreten. Sie sind jedoch oftmals durch sehr lange Pulkauflösungswege im Vergleich zur Gesamtheit der betrachteten Pulks gekennzeichnet. Zur Vermeidung einer Überdimensionierung erscheint es somit zulässig, anhand der gewählten Kriterien die Länge von Überholabschnitten zu begrenzen.

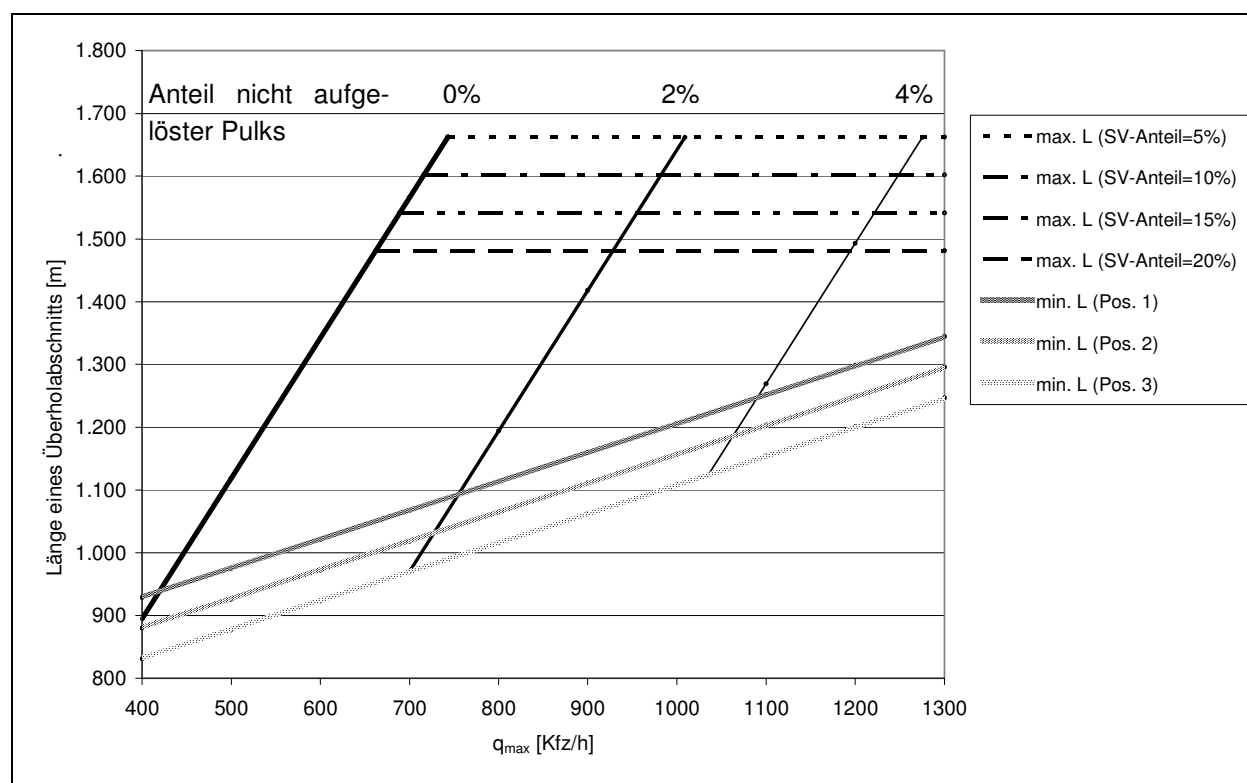


Bild 14.1: Bestimmung der Länge von Überholabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition in einem teilplanfreien Knotenpunkt beginnen

Bei Abschnitten, die mit einem unkritischen Wechsel beginnen, erscheint ein Abschlag von der anhand Bild 14.1 ermittelten erforderlichen Abschnittslänge zur vollständigen Pulkauflösung von rund 75 m aufgrund der Ergebnisse zur Analyse der Pulkführer und den sich daraus ergebenden Unterschieden im Hinblick auf den Beginn der Pulkauflösung zulässig (vgl. Ziffern 11 und 13). Die maximale Länge eines Überholabschnitts kann bei diesen Abschnitten um 200 m länger ausfallen, da hier lediglich die Sperrflächen an den Wechseln zur Länge eines Überholabschnitts dazu addiert werden müssen, um die Länge der Vorlaufstrecke der Gegenrichtung zu

erhalten. Bei Abschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition in einem teilplanfreien Knotenpunkt beginnen, ist im Gegensatz zur vergleichsweise kurzen Sperrfläche eines unkritischen Wechsels noch der bauliche Knotenpunktbereich zu berücksichtigen. Dieser wurde mit etwa 200 m angenommen.

14.3 Querschnittsgestaltung

In ihrer Forschungsarbeit aus dem Jahr 1999 wurden von PALM und SCHMIDT verschiedene Fahrstreifen- und Fahrbahnbreiten hinsichtlich ihrer Verkehrssicherheit bewertet. Die Sicherheitsbewertung fand dabei u. a. durch den Vergleich verschiedener Unfallkenngrößen statt. Es wurde deutlich, dass einer Fahrstreifenbreite von 3,50 m mit einem Randstreifen von 0,50 m aus Sicherheitsgründen der Vorzug zu geben ist. Um jedoch bei den einstreifigen Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken eine Vorbeifahrmöglichkeit bei Betriebsdienstfahrzeugen oder liegen gebliebenen Fahrzeugen zu schaffen, ohne dass in den Gegenverkehr eingegriffen werden muss, sollte eine Breite von mind. 5,25 m vorgesehen werden. Dies würde bei einer nach StVZO §32 zulässigen Fahrzeugbreite von 2,55 m noch 15 cm Sicherheitsabstand bedeuten. Die im Entwurf befindlichen neuen RAL schlagen daher vor, neben dem 3,50 m breiten Fahrstreifen zum einen einen Randstreifen von 0,75 m und zum anderen einen 1,00 m breiten verkehrstechnischen Mittelstreifen einzurichten. Der vergleichsweise breitere verkehrstechnische Mittelstreifen kann zusätzlich noch die Wirkung eines Unterscheidungsmerkmals zwischen den verschiedenen Entwurfsklassen gemäß der RAL übernehmen (Stichwort „self explaining roads“). Hinsichtlich der optimalen Ausführung dieses verkehrstechnischen Mittelstreifens sind Erkenntnisse aus einem derzeit laufenden Forschungsprojekt zu erwarten.

Die Untersuchung von WEBER und LÖHE (2003) hat gezeigt, dass zwar bei allen von ihnen betrachteten Untersuchungsstrecken die vorhandenen Bankettbreiten innerhalb der einstreifigen Abschnitte nicht die gemäß den Richtlinien geforderten 2,5 m aufweisen, dies sich jedoch nicht im Unfallgeschehen niedergeschlagen hat. Es scheint somit zulässig, die Bankettbreite auf lediglich 1,50 m zu verschmälern. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass in Dammlage und gleichzeitiger Anordnung von passiven Schutzeinrichtungen (SE) im Seitenraum (z.B. als Absturzsicherung) eine Bankettbreite von mind. 1,80 m vorzusehen ist, um auch Stahlsysteme mit einem Wirkungsbereich W4 (=1,30 m) einbauen zu können ($1,80\text{ m} = 1,30 + 0,50\text{ m}$ Abstand vom Fahrbahnrand zur SE).

14.4 Knotenpunkte

Da die von WEBER und LÖHE (2003) betrachteten Untersuchungsstrecken mit einer gestreckten Linienführung und teilplanfreien Knotenpunkten die günstigsten Unfallkostenraten und ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsniveau aufwiesen, sollte für 2+1-Strecken nach Möglichkeit ein hoher Ausbaustandard angestrebt werden. Aus dieser Forderung lässt sich ableiten, dass Wechselstellen nach Möglichkeit so angeordnet werden, dass im Bereich von Knotenpunkten eine Fahrstreifenaddition für den einmündenden Verkehr erfolgt. Bei dieser Knotenpunktgestaltung konnten von WEBER und LÖHE keine nennenswerten Beeinträchtigungen des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit festgestellt werden.

Die von WEBER und LÖHE empfohlene Einrichtung teilplanfreier Knotenpunkte im Zuge von 2+1-Strecken lässt sich durch die Arbeit von KÖLLE (1999) stützen. Die Empfehlung von KÖLLE lautet, dass teilplanfreie Knotenpunkte dort angeordnet werden sollen, wo hohe Reisegeschwindigkeiten bei gleichzeitig geringen Knotenpunktabständen und hoher Knotenpunktbelastung erzielt werden sollen. Da es sich bei 2+1-Strecken um Straßen der Straßenkategorie LS I handelt (vgl. FGSV, 2007), sollen dort hohe Reisegeschwindigkeiten gewährleistet werden. Gleichzeitig herrschen bei 2+1-Strecken i.d.R. auch hohe Knotenpunktbelastung vor.

Die geäußerten Bedenken, dass die „hohen“ Geschwindigkeiten auf der freien Strecke in den teilplanfreien Knotenpunkt „hineingetragen“ werden, können auf Basis der im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Analysen zum Geschwindigkeitsverhalten nicht gestützt werden. Zunächst einmal gilt es festzuhalten, dass in den (teilplanfreien) Knotenpunkt lediglich aus einer Vorlaufstrecke eingefahren wird, nicht aus einem Überholabschnitt. Bei den Vorlaufstrecken (außerhalb und innerhalb) hat sich gezeigt, dass hier Exzessivgeschwindigkeiten lediglich in einer marginalen Anzahl beobachtet werden mussten (vgl. Tabelle 8.2) und auch Überschreitungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit treten auf den Vorlaufstrecken lediglich in einer Größenordnung auf, wie sie auch bei den „normalen“ zweistreifigen Landstraßenquerschnitten verzeichnet werden müssen.

Weiterhin haben die aus der Untersuchung von KÖLLE abgeleiteten Ergebnisse (vgl. Ziffer 2.4) auch gezeigt, dass teilplanfreie Knotenpunkte im Zuge von 2+1-Strecken beim Vergleich mit anderen Knotenpunktarten im Zuge von 2+1-Strecken, aber auch mit anderen teilplanfreien Knotenpunkten im Zuge von zweistreifigen Landstraßen eine deutlich höheres Sicherheitsniveau aufweisen.

Literaturverzeichnis

- [1] BAKABA, J. E.
Streckentypisierung und Geschwindigkeiten – Ein Ansatz zur Differenzierung des Geschwindigkeitsverhaltens unbeeinflusster Fahrer auf zweistreifigen Außerortsstraßen. In: Straßenverkehrstechnik 2005, Heft 10, Berlin 2005
- [2] BASELAU, C.
Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung der Verkehrsqualität auf Straßen mit 2+1-Verkehrsführung. Schriftenreihe Professur Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Bauhaus-Universität Weimar, Heft 03, Weimar 2006
- [3] BERGH T, CARLSSON, A.
2+1-roads with and without cable-barriers – speed performance. In: Transportation Research Board (Hrsg.), Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity, Maui, 2002
- [4] BEHRENDT, J., ROHLOFF, M.
Aktuelle Entwicklungen in der Querschnittsgestaltung von Außerortsstraßen. In: Straße und Autobahn 1994, Heft 4
- [5] BICKELHAUPT, R.
Beurteilung des dreistreifigen Querschnittstyps 2+1 unter besonderer Berücksichtigung des Schwerverkehrs. Heft 38 der Veröffentlichungen des Instituts für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, 1991
- [6] BICKELHAUPT, R.
Beurteilung von b2+1-Querschnitten. Heft 49 der Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, 1996
- [7] BITZL, F.
Die Auswirkungen überhöhter Verkehrsgeschwindigkeit für den Landstraßenbau. In: Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg 1966
- [8] BRANNOLTE, U., BARTH, H.-B., JUNKERS, W., YUNTONG LIU, SCHWARZMANN, R., SIGTHORSSON, H., STEIN, J.
Unfallauswertung für ausgewählte Streckenabschnitte mit Zwischenquerschnitten. Forschungsbericht zum FP 8527/6 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Karlsruhe 1991
- [9] BRANNOLTE, U., BARTH, H.-B., SCHWARZMANN, R.
Sicherheitsbewertung von Querschnitten außerörtlicher Straßen. Heft V 5 der Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1993
- [10] BRANNOLTE, U, BASELAU, C., DONG, P.
Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke und Verkehrsablauf auf neuen Querschnitten nach RAS-Q 96: Untersuchung des Verkehrsablaufs auf dem Straßentyp RQ 15,5. Heft 899 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 2004
- [11] BRANNOLTE, U., DILLING, J., DURTH, W., HARTKOPF, G., MEEWES, V., ROHLOFF, M., SCHLIESING, H., STIEVERMANN, P.
Einsatz von Zwischenquerschnitten. Heft 265 der Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 1992

-
- [12] BUCK, M.
Geschwindigkeitsverhalten auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen in Abhängigkeit von baulichen, betrieblichen und verkehrlichen Randbedingungen. Heft 621 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1992
- [13] CARLSON, P.J., MILES, J.D., JOHNSON, P.K.
Daytime High-Speed Passing Manoeuvres Observed on Rural Two-Lane, Two-Way Highways – Findings and Implications. Transportation Research Record: Journal of the TRB, No. 1961, Washington D.C., 2006
- [14] DIETRICH, K.
Kolonnenbildung und Überholen. In: Straße und Verkehr, 1965, Heft 11
- [15] DIETRICH, K., BOPPART, E., LINDEMANN, H. P.
Zwischentypen – Eine Untersuchung über mögliche Betriebsformen für Hochleistungsstraßen. IVT-Bericht Nr. 83/2 der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1983
- [16] DURTH, W.
Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer, Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung. Heft 163 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1974
- [17] DURTH, W.
Dokumentation der Bereisung von Zwischenquerschnitten im November 1986 durch die Projektgruppe „Zwischenquerschnitte“ der Bundesanstalt für Straßenwesen. Darmstadt 1986
- [18] DURTH, W. HABERMEHL, K.
Überholvorgänge auf einbahnigen Straßen. Heft 489 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1986
- [19] EBERSBACH, D.
Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit. Dissertation an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden, 2006
- [20] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte (RAS-Q 82). Köln 1982
- [21] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil III: Knotenpunkte (RAS-K), Abschnitt I (RAS-K-1). Köln 1988
- [22] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L). Köln 1995
- [23] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte (RAS-Q 96). Köln 1996
- [24] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. Köln 2000
- [25] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001). Köln 2001
- [26] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN
Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) – Entwurf. Stand: 07.03.2007. Arbeitsgruppe Straßenentwurf, Köln 2007

- [27] FRIEDRICH, B., DAMMANN, W., IRZIK, M.
Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 131, Bergisch Gladbach 2005
- [28] FRIEDRICH, B., IRZIK, M., HOFFMANN, S.
Verkehrsablauf an Autobahnausfahrten des Typs A 2 der RAL-K-2. Heft 946 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn 2006
- [29] FROST, U., KELLER, H., KIRCHHOFF, P.
Untersuchungen von Zwischenquerschnitten in Bayern. Schlussbericht zum FP 8527/9, Lehrstuhl für Verkehrs- und Stadtplanung der Technischen Universität München, 1989
- [30] FROST, U., KELLER, H., KIRCHHOFF, P.
Empirische Untersuchungen zu Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Zwischenquerschnitten in Bayern. In: Straße und Autobahn, 1992, Heft 6
- [31] GATTIS, J.L., BHAVE, R., DUNCAN, L.K.
Alternating Passing Lane Lengths. Transportation Research Record: Journal of the TRB, No. 1961, Washington D.C., 2006
- [32] GRABE, W., STOLZ, M.
Ein Beitrag zur Frage der erforderlichen Überholsichtweite auf zweispurigen Straßen. In: Straße und Autobahn 1968, Heft 4
- [33] HARTUNG, J.
Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. R. Oldenbourg Verlag München, 13. Auflage, Dortmund 2002
- [34] HERZ, R., SCHLICHER, H. G., SIEGENER, W.
Angewandte Statistik für Verkehrsplaner. Werner Ingenieur Texte 42, 2. Auflage, Düsseldorf 1992
- [35] HIERSCHE, E.-U., BICKELHAUPT, R.
Untersuchung von Zwischenquerschnitten auf der B10 bei Landau. Schlussbericht zum FP 8527 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, 1991
- [36] HÜFTLE, M.
Statistische Schätz- und Testverfahren - "Schätzen und Testen von statistischen Verteilungen" (Juli 2006). In: OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, www.optiv.de bzw. <http://130.75.52.33/Methoden/StaTeMet/index.html>, Stand: 09.09.2007
- [37] JÄHRIG, T.
Verkehrsablauf und Geschwindigkeitsverhalten auf Landstraßen mit einzelnen, wiederholt angeordneten Überholfahrstreifen. Diplomarbeit Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Institut für Verkehrsanlagen, Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen, Dresden 2006
- [38] KAYSER, H.J., STRUIF, R.
Maßnahmen zur Beeinflussung des Überholverhaltens. Heft 690 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1996
- [39] KIRSCH, T., WOLFF, B.
Pulkbildung auf 2+1-Strecken. Projektarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover, 2005

-
- [40] KLEINSCHMIDT, P.
Bewertung des Verkehrsablaufes und Bemessung zweispuriger Landstraßen. In: Straße 1988, Heft 2
 - [41] KÖLLE, M.
Sicherheitseigenschaften außerörtlicher Knotenpunkte. Heft V 67 der Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 1999
 - [42] KRÄMER, W., SCHOFFER, O., TSCHIRSCH, L.
Datenanalyse mit SAS® - Statistische Verfahren und ihre grafischen Aspekte. Hrsg. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
 - [43] KREBS, H. G., KLÖCKNER, J. H.
Untersuchungen über Unfallraten in Abhängigkeit von Straßen- und Verkehrsbedingungen außerhalb geschlossener Ortschaften. Heft 223 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1977
 - [44] KÜHNE, L.
Betrieb als Kraftfahrstraße oder Zulassung für den allgemeinen Verkehr – Einsatzmöglichkeiten für den Querschnitt b2+1. Diplomarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover, 1997
 - [45] LENSING, N.
Straßenverkehrszählung 2000. Hrsg. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2003
 - [46] LENZ, K.H.
Geschwindigkeit und Verkehrssicherheit. In: Mehr Sicherheit auf den Straßen: Probleme und Prioritäten, Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e. V., Reihe B, Heft B 79, Bergisch Gladbach 1984
 - [47] LENZ, K.H.; STEINHOFF, H.
Ein Ansatz zur Definition von Fahrzeugpuls. In: Straßenverkehrstechnik 1976, Heft 1
 - [48] LEUTZBACH, W.; BRANNOLTE, U.
Der Überholdruck – Zum Zusammenhang zwischen Überholparametern und Unfallraten auf Landstraßen. In: Straße und Autobahn 1989, Heft 2
 - [49] LEUTZBACH, W.; BRANNOLTE, U.; SCHMIDT, M.
Untersuchung des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Straßen unter besonderer Berücksichtigung langsamer Fahrzeuge. Heft 551 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1989
 - [50] LINDNER, T.
Wirkungen von Zwischenquerschnitten im Zuge einbahniger Außerortsstraßen auf Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit. Dissertation an der Technischen Universität München, Fakultät Bauingenieurwesen, München 1988
 - [51] LIESKE, C., WENKER, N.
Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf auf 2+1-Strecken. Projektarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover, 2005
 - [52] LIPPOLD, C.
Weiterentwicklung ausgewählter Entwurfsgrundlagen von Landstraßen. Dissertation an der Technischen Hochschule Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen, Darmstadt 1997
 - [53] MEEWES, V.
Mobile und ortsfeste Geschwindigkeitsüberwachung– Auswirkungen auf Verhalten und Verkehrssicherheit. Heft 34 der Schriftenreihe „Mitteilungen der Beratungsstelle für Schadenverhütung“, Köln 1993

- [54] MEEWES, V.
Sicherheit von Landstraßen-Knotenpunkten (Teil 1-3). In: Straßenverkehrstechnik 2003, Teil 1: Heft 4, Teil 2: Heft 5, Teil 3: Heft 6
- [55] MEEWES, V., MAIER, R.
Modellversuch B 33: „2+1“-spurige Landstraße. Heft 22 der Schriftenreihe „Mitteilungen der Beratungsstelle für Schadenverhütung“, Köln 1984
- [56] MEEWES, V., STIEVERMANN, P., LEOPOLD, K.
Erfahrungen mit „2+1“-spuriger Verkehrsführung. In: Straße und Autobahn 1991, Heft 3
- [57] NALIMOV, V. V.
The Application of Mathematical Statistics to Chemical Analysis. Oxford: Pergamon 1963
- [58] NETZER, M.
Der Überholvorgang auf Landstraßen unter Berücksichtigung der Verkehrssicherheit. Heft 50 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1966
- [59] PALM, I.; SCHMIDT, G.
Querschnittsbreiten einbahniger Außerortsstraßen und Verkehrssicherheit und Sonderuntersuchung zum Querschnittstyp b2+1. Heft V 64 der Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 1999
- [60] PETZOLDT, T.
Konstruktion ökologischer Modelle mit der Open Source Software R. Tutorial im Rahmen des Workshops „Modellierung für Limnologen“, Institut für Hydrobiologie, Technische Universität Dresden, 2003
- [61] PRIEMER, C.
Überholverhalten auf 2+1-Strecken. Diplomarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover, 2004
- [62] ROOS, R.
Pulkbildung und Pulkauflösung als Kriterien zur Bemessung dreistreifiger Außerortsstraßen mit der Betriebsform b2+1. Dissertation an der TH Darmstadt, 1989
- [63] ROOS, R.
Bemessungskriterien zur Abschätzung günstiger Abschnittslängen bei dreistreifigen Straßen der Betriebsform b2+1. In: Straße und Autobahn 1990, Heft 8
- [64] SCHAECHTERLE, K.-H., LINDNER, T.
Zwischenquerschnitte – Untersuchung der B 471 bei Dachau. Schlussbericht zum FP 8527/2 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Technische Universität München, 1987
- [65] SCHMIDT, G.
Ergebnisse von Geschwindigkeits- und Unfalluntersuchungen auf zweistreifigen Landstraßen. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit 42, Heft 4, 1996
- [66] STEIERWALD, G., JACOBS, F., FEIER, H.
Überholverhalten und Qualität auf zweispurigen Landstraßen mit Gegenverkehr. Heft 472 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1986
- [67] STEINAUER, B., SCHUCKLIEß, W., BECHER, T.
Übergreifende Bewertung von Streckenabschnitten und Knotenpunkten auf Landstraßen, Entwurf des Schlussberichts zum FE 03.371/2004/AGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen, 2007

-
- [68] TRAPP, K.-H.
Untersuchungen über den Verkehrsablauf auf Landstraßen. Heft 113 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1971
- [69] TRAPP, K.-H., KRAUS, B.
Messung und Überprüfung der Einflüsse: Steigungsklassen, Kurvigkeit, Überholmöglichkeit und Fahrstreifenbreite im Bemessungsverfahren RAS-Q. Heft 381 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1983
- [70] TUKEY, JOHN W.
Exploratory data analysis. Addison-Wesley, 1977
- [71] WEBER R., LÖHE U.
Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf auf b2+1-Strecken mit allgemeinem Verkehr. Heft V 109 der Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2003
- [72] WIEDEMANN, R.
Simulation des Verkehrsflusses. Schriftenreihe des Institutes für Verkehrswesen, Heft 8, Universität Karlsruhe, 1974
- [73] WILSON, T., BEST, W.
Drivin Strategies in Overtaking. In: Accident Analyses and Preview, Vol. 14, No. 3 198 Pergam Press Ltd., 1982

Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1: Regelquerschnitte gemäß den RAS-Q 82 (FGSV, 1982)	5
Bild 2.2: Von der Projektgruppe „Zwischenquerschnitte“ betrachtete Querschnitte (BRANNOLTE ET. AL., 1992)	5
Bild 2.3: Regelquerschnitt 15,5 nach den RAS-Q 96 (FGSV, 1982)	6
Bild 2.4: Markierung und Beschilderung von Straßen mit dem RQ 15,5 und der Betriebsform 2+1 (links kritischer Wechsel, rechts unkritischer Wechsel) gemäß den RAS-Q 96 (FGSV, 1982)	7
Bild 2.5: RQ 11,5+ gemäß den neuen, in der Erarbeitung befindlichen Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL, FGSV, 2007); a) mit Überholfahrstreifen; b) ohne Überholfahrstreifen mit Überholverbot	14
Bild 2.6: Zusammenhang zwischen der mittleren Pulklänge und der Verkehrsstärke LINDNER (1988)	20
Bild 2.7: Nomogramm zur Abschätzung der erforderlichen Länge eines Überholabschnitts von 2+1-Strecken (ROOS, 1989)	22
Bild 3.1: Beginn des Überholabschnitts mit einer Fahrstreifenaddition an einem teilplanfreien Knotenpunkt (PRIEMER, 2004)	27
Bild 5.1: Camcordereinheit (links) und Kombination von Kamera und Aufnahmegerät (Mitte und rechts) (PRIEMER, 2004)	34
Bild 5.2: Messaufbau zur Erfassung des Überholverhaltens auf 2+1-Strecken (PRIEMER, 2004)	35
Bild 5.3: Bestimmung der Pulkauflösung in nicht erfassten Bereichen (PRIEMER, 2004)	36
Bild 5.4: Kameraeinheit auf Mast (PRIEMER, 2004)	36
Bild 5.5: Geschwindigkeitsmessung (PRIEMER, 2004)	38
Bild 5.6: Messaufbau für die Geschwindigkeitsmessungen (PRIEMER, 2004)	38
Bild 6.1: Definition des Einscherens (PRIEMER, 2004)	48
Bild 6.2: Definition des Ausscherens (PRIEMER, 2004)	48
Bild 6.3: Varianten der Pulkängenbestimmung (PRIEMER, 2004)	52
Bild 6.4: Vier Phasen der Pulkauflösung bei Überholabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition beginnen (PRIEMER, 2004)	53
Bild 6.5: <i>Virtuelle</i> Einscherstation des letzten Fahrzeugs in einem Pulk (PRIEMER, 2004)	53
Bild 8.1: Häufigkeitsverteilung der lokalen Geschwindigkeiten für den Untersuchungsabschnitt 1 (n=100)	59
Bild 8.2: Häufigkeitsverteilung der lokalen Geschwindigkeiten für den Untersuchungsabschnitt 2 (n=100)	60

Bild 8.3: Vergleich der auf den Vorlaufstrecken 4 und 14 ermittelten Geschwindigkeiten V_{85} mit dem entsprechenden von EBERSBACH (2006) definierten Fahrstil „sportlich“	64
Bild 8.4: Zusammenhang zwischen dem SV-Anteil und der mittleren Geschwindigkeit V_m auf dem Überholfahrstreifen von Abschnitten, die sich nicht an Pos. 1 befinden	73
Bild 9.1: Verteilung der Ausschervorgänge auf der Länge des Untersuchungsabschnitts 1	78
Bild 9.2: Verkehrsstärke und Anzahl der Überholvorgänge.....	79
Bild 9.3: Verteilung der Einschervorgänge am Ende des Untersuchungsabschnitts 7	81
Bild 9.4: Zusammenhang zwischen der Länge der Überholabschnitte und dem Anteil der Einscherer am Ende (n=73).....	84
Bild 9.5: Gegenüberstellung der Anzahl der Sperrflächenüberfahrten mit dem Anteil der Einscherer am Ende an allen Einschervorgängen (n=73)	87
Bild 9.6: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der gewichteten Summe aller Konflikte (n=21)	89
Bild 9.7: Zusammenhang zwischen dem Anteil der Einscherer am Ende an allen Einschervorgängen und der gewichteten Summe aller Konflikte (n=21)	90
Bild 10.1: Häufigkeitsverteilung der beobachteten Pulklänge (n=3.163)	93
Bild 10.2: Häufigkeitsverteilung der ermittelten 85 %-igen Pulklänge (n=111)	94
Bild 10.3: Anzahl der Pulks auf Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf der Vorlaufstrecke und deren Länge.....	97
Bild 10.4: Anzahl der Fahrzeuge in Pulks auf Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf der Vorlaufstrecke und deren Länge	98
Bild 10.5: Pulkanteil auf Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf der Vorlaufstrecke und deren Länge.....	99
Bild 10.6: Vergleich der für die Vorlaufstrecke Nr. 8 ermittelten Pulkanteile mit dem von FROST, KELLER und KIRCHHOFF (1989) entwickelten Trend	100
Bild 10.7: Pulklänge auf Vorlaufstrecken außerhalb von 2+1-Strecken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf der Vorlaufstrecke und deren Länge.....	101
Bild 10.8: Vergleich der nach den modifizierten Ergebnissen von KIRSCH und WOLFF geschätzten Pulkanteile mit den im Nomogramm von ROOS dargestellten Pulkanteilen (vgl. Bild 2.7).....	107
Bild 10.9: Häufigkeitsverteilung der ermittelten 85 %-igen Pulklänge für Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken (n=57)	110
Bild 10.10: Zusammenhang zwischen dem Pulkanteil und der 85 %-igen Pulklänge unter Verwendung der Pulkdefinition (A) nach ROOS (1989) (n=56)	113
Bild 10.11: Vergleich der nach den Ergebnissen von KIRSCH und WOLFF geschätzten Pulklänge mit der im Nomogramm von ROOS dargestellten Pulklänge (vgl. Bild 2.7)	114
Bild 11.1: Einscherweg der Pulkführer aus dem Durchgangsstrom und Anteil des Einfahrstroms an der Gesamtverkehrsstärke (n = 11).....	119

Bild 12.1: Boxplots für den benötigten Weg für die Pulkauflösung in Abhängigkeit von der Pulklänge (n=1.384)	121
Bild 12.2: Der von 85 % der Pulks benötigte Weg für die Pulkauflösung in Abhängigkeit von der Pulklänge (n=1.384)	122
Bild 12.3: Ermittlung der erforderlichen Länge von Überholabschnitten in Abhängigkeit verschiedener Qualitätsansprüche im Hinblick auf den Anteil nicht aufgelöster Pulks	129
Bild 14.1: Bestimmung der Länge von Überholabschnitten, die mit einer Fahrstreifenaddition in einem teilplanfreien Knotenpunkt beginnen	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Erforderliche Länge des Überholabschnitts in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke nach HARWOOD ET. AL. (in GATTIS, BHAVE und DUNCAN, 2006).....	23
Tabelle 3.1: Untersuchungsabschnitte.....	29
Tabelle 6.1: Entscheidungstabelle (aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie: www.wikipedia.de , Stand: 10.07.2007).....	44
Tabelle 7.1: Maximale beobachtete Verkehrsstärken und zugehörige Verkehrszusammensetzung auf den Untersuchungsabschnitten.....	56
Tabelle 8.1: Ergebnisübersicht zur statistischen Auswertung der lokalen Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen der Untersuchungsabschnitte	58
Tabelle 8.2: Ergebnisübersicht zur statistischen Auswertung der lokalen Geschwindigkeiten auf den Vorlaufstrecken.....	58
Tabelle 9.1: Datengrundlage für die Betrachtungen zu den Ein- und Ausschervorgängen.....	78
Tabelle 9.2: Gegenüberstellung der verkehrlichen Kenngrößen mit den Ergebnissen der Verkehrssituationsanalyse.....	88
Tabelle 10.1: Anzahl der Pulks	92
Tabelle 10.2: Ergebnis des Modellvergleichs für die Bestimmung des Pulkanteils anhand des Theil'schen Ungleichheitskoeffizient U.....	108
Tabelle 10.3: Güte der Schätzung der Pulklänge gemäß Pulkdefinition B anhand des Theil'schen Ungleichheitskoeffizient U	115
Tabelle 11.1: Anzahl und Anteil von Fahrzeugen des Schwerverkehrs an allen Pulkführern während der beobachteten Spitzenstunde.....	117
Tabelle 11.2: Einscherstation der Pulkführer an Abschnitten mit Fahrstreifenaddition	118
Tabelle 12.1: Stichprobenumfang zur Analyse der Pulkauflösung	120
Tabelle 12.2: Anzahl und Anteil der nicht aufgelösten Pulks.....	128

Verzeichnis der Anhänge

A 1 2+1-Strecken in Deutschland (Stand: 2000).....	1
A 2 Untersuchungsstrecken und Untersuchungsabschnitte	4
A 3 Lokale Geschwindigkeiten	31
A 4 Aus- und Einschervorgänge	41
A 5 Überprüfung des zur Bestimmung des Pulkanteils von TRAPP aufgestellten Modells (vgl. Gleichung 2.6) anhand Vorlaufstrecke Nr. 14	65
A 6 Schätzung des Pulkanteils auf Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken (Verfahrensvergleich mittels des Theil'sche Ungleichheitskoeffizienten U) ...	66
A 7 Ausreißertest von WALSH.....	70
A 8 Vergleich zwischen Empirie und modelltechnisch ermittelter 85 %-igen Pulklänge auf Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken mittels des Theil'sche Ungleichheitskoeffizienten U.....	71
A 9 (Bereinigte) Datenbasis zur Bestimmung des Pulkauf Lösungswegs	73

A 1 2+1-Strecken in Deutschland (Stand: 2000; ohne Gewähr)

Bundesland	Straße	von	nach	Gesamtstreckenlänge	DTV [Kfz/24h]	V _{zul} [km/h]	Betriebsform	Anzahl Wechsel	Knotenpunkte
BR	B2	OU Schwedt	OU Schwedt	6,0	-	100	Kraftfahrstr.	-	Keine
BR	B87	OU Beeskow	OU Beeskow	7,0	-	100	Kraftfahrstr.	4	Keine
BR	B112	Güldendorf	Lossow	2,8	-	100	Kraftfahrstr.	2	Keine
BR	B166	OU Gramzow-Zichow	OU Gramzow-Zichow	3,0	-	100	Kraftfahrstr.	2	Keine
BR	B167	OU Wriezen	OU Wriezen	2,0	-	100	Kraftfahrstr.	2	keine
BW	B28a	AS Rottenburg	Rottenburg	3,8	-	100	Kraftfahrstr.	2	keine
BW	B31n	Stockach	Überlingen	10,0	12.700	120	Kraftfahrstr.	4	keine
BW	B31	Rotenbach	Titisee-Neustadt	4,3	-	100	Kraftfahrstr.	3	TPF
BW	B33	Gengenbach	Biberach	5,6	18.000	100	Kraftfahrstr.	4	keine
BW	B292	Aglasterhausen	Obrigheim	7,8	12.870	100	Allg. Verkehr	8	PG
BW	B292	Sinsheim	Waibstadt	3,4	19.190	100	Allg. Verkehr	4	PG/TPF
BW	B294	OU Waldkirch	OU Waldkirch	3,6	16.500	80	Allg. Verkehr	4	TPF
BW	B317	Feldberg	Todtau	3,1	3.540	100	Allg. Verkehr	3	PG
BY	B20	Cham	Straubing	11,0	20.000	100	Kraftfahrstr.	7	PG
BY	B300	Langenbrück	Peutenhausen	14,4	10.000	100	Kraftfahrstr.	10	TPF
BY	B471	OU Dachau	OU Dachau	6,4	16.000	100	Kraftfahrstr.	4	TPF
HE	B7	Kaufungen	Helsa	5,1	20.500	100	Kraftfahrstr.	4	keine
HE	B7	Helsa	Fürstenhagen	6,6	18.000	100	Kraftfahrstr.	4	PG
HE	B27	Bad Sooden-Allendorf	Albungen	2,3	-	100	Allg. Verkehr	2	keine
HE	B27	Bebra	Mecklar	6,8	-	100	Kraftfahrstr.	6	TPF
HE	B27	Asmushausen	Cornberg	3,9	-	100	Kraftfahrstr.	4	PG
HE	B27	OU Sontra	OU Sontra	3,0	7.000	100	Allg. Verkehr	2	PG
HE	B27	OU Hünfeld	OU Hünfeld	5,6	13.400	100	Allg. Verkehr	2	PG
HE	B40	Neuhof Nord	Eichenzell	5,0	25.500	100	Kraftfahrstr.	2	keine
HE	B49	Leun	Niederbiel	4,5	19.000	100	Kraftfahrstr.	4	keine
HE	B49	Obertiefenbach	Ahlbach	4,4	25.500	80	Allg. Verkehr	1	TPF

Bundesland	Straße	von	nach	Gesamtstreckenlänge	DTV [Kfz/24h]	V _{zul} [km/h]	Betriebsform	Anzahl Wechsel	Knotenpunkte
HE	B49	Weilburg	Biskirchen	5,5	18.800	100	Kraftfahrstr.	4	PG
HE	B54	Ahlbach	Oberzeuzheim	4,9	14.200	100	Allg. Verkehr	4	TPF
HE	B62	Cölbe	Kirchhain	8,2	13.000	100	Kraftfahrstr.	6	PG
HE	B83	Espenau	Hofgeismar	9,4	11.600	100	Allg. Verkehr	6	PG
HE	B253	AS Melsungen	Melsungen	3,9	11.800	100	Allg. Verkehr	3	PG
HE	B417	Wiesbaden	Neuhof	6,3	19.000	100	Allg. Verkehr	1	PG/TPF
NI	B3	OU Pattensen	OU Pattensen	6,9	10.000	100	Allg. Verkehr	5	TPF
NI	B4	OU Uelzen	OU Uelzen	4,4	8.000	100	Allg. Verkehr	3	TPF
NI	B64	OU Holzminden	OU Holzminden	2,4	6.600	100	Kraftfahrstr.	2	PG/TPF
NI	B72	OU Friesoyte	OU Friesoyte	4,9	6.200	100	Kraftfahrstr.	3	TPF
NI	B72	OU Friesoyte	OU Friesoyte	6,0	-	100	Kraftfahrstr.	4	TPF
NI	B72	OU Friesoyte	OU Friesoyte	6,3	-	100	Kraftfahrstr.	4	TPF
NI	B83	OU Hess. Oldendorf	OU Hess. Oldendorf	10,0	9.300	100	Allg. Verkehr	8	TPF
NI	B210	OU Jever	OU Jever	6,8	13.000	100	Kraftfahrstr.	4	TPF
NW	B1	Paderborn	Schlangen	8,8	17.000	100	Kraftfahrstr.	8	TPF
NW	B1	Horn	Schlangen	3,5	10.600	100	Kraftfahrstr.	2	keine
NW	B51	Dahlem	A 1 Tondorf	12,7	11.000	100	Allg. Verkehr	8	PG
NW	B51	AS Prüm	Prüm	4,0	-	100	Kraftfahrstr.	-	-
NW	B54	Burbach/Haiger	Siegerland	7,2	8.200	100	Kraftfahrstr.	6	keine
NW	B54	Altenberge	Münster	8,7	26.000	100/120	Kraftfahrstr.	5	keine
NW	B54	Altenberge	Burgsteinfurt	16,2	24.000	100	Kraftfahrstr.	10	TPF
NW	B67	Borken	Reken	11,7	8.000	100	Kraftfahrstr.	7	TPF
NW	B266	Kommern	Obergartzem	4,2	13.300	100	Allg. Verkehr	6	PG
NW	B481	OU Greven	OU Greven	3,7	14.900	100	Allg. Verkehr	1	TPF
NW	B482	Dankersen	Wietersheim	4,0	11.500	100	Allg. Verkehr	3	TPF

Bundesland	Straße	von	nach	Gesamtstreckenlänge	DTV [Kfz/24h]	V _{zu} [km/h]	Betriebsform	Anzahl Wechsel	Knotenpunkte
RP	B10	Hinterweidenthal	Wilgartswiesen	11	13.700	100	Allg. Verkehr	7	PG/TPF
RP	B10	Albertsweiler	Landau	7,2	22.000	100	Kraftfahrstr.	7	PG
RP	B41	Martinstein	Monzingen	5,7	14.600	100	Kraftfahrstr.	7	PG
RP	B50	Büchernbeuren	Simmern	23,6	11.000	100	Kraftfahrstr.	8	PG
RP	B51	Meckel	Bitburg	8,7	20.000	100	Allg. Verkehr	10	PG/TPF
SL	B5	OU Itzehoe	OU Itzehoe	ca. 6,0	-	100	Kraftfahrstr.	2	TPF
SL	B41	Ottweiler	St. Wendel	4,6	13.000	100	Kraftfahrstr.	3	TPF

A 2 Untersuchungsstrecken und Untersuchungsabschnitte

A 2.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die sechs Untersuchungsstrecken mit den zugehörigen 15 Untersuchungsabschnitten beschrieben. Alle Untersuchungsstrecken sind als Kraftfahrtstraße ausgewiesen und haben eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Darüber hinaus sind diese Bundesstraßen im Bereich der Untersuchungsabschnitte im ebenen Gelände trassiert worden. So liegen die vorhandenen Längsneigungen zwischen -2 % und +2 %. Die Kurvigkeit der betrachteten Abschnitte ist ebenfalls als gering einzustufen.

Die Untersuchungsabschnitte lassen sich nach der Ausbildung ihres Beginns in zwei Gruppen einteilen:

- Die erste Gruppe umfasst die Untersuchungsabschnitte 1 bis 11. Die Knotenpunktgrundform ist dabei an allen Abschnitten identisch. Jeder zweistreifige Abschnitt beginnt mit einer Fahrstreifenaddition an einem teilplanfreien Knotenpunkt.
- Die zweite Gruppe, bestehend aus den Untersuchungsabschnitten 12 bis 15, steht nicht unter dem Einfluss eines Knotenpunkts. Der Beginn ist hier als unkritischer Wechsel, gemäß den RAS-Q ausgebildet.

Neben einer allgemeinen Beschreibung der einzelnen Untersuchungsabschnitte wird explizit auf die Ausbildung der Wechsel am Beginn und am Ende der Untersuchungsabschnitte sowie die Charakteristika, die zur Auswahl der Untersuchungsabschnitte geführt haben (DTV, SV-Anteil, Länge des Untersuchungsabschnitts), eingegangen. Weiterhin lassen sich Angaben zu weiteren Merkmalen, wie z. B. evtl. vorhandene Streckenverbote, finden. Schließlich werden die Erhebungs- und Auswertezeiträume aufgeführt.

A 2.2 Untersuchungsstrecke 1 (B 210 OU Jever)

Die B 210 bildet die Ost-West Verbindung zwischen Aurich und Wilhelmshaven. Die drei Untersuchungsabschnitte sind ein Teil der 1993 fertig gestellten Ortsumgehung (OU) Jever. Je Fahrtrichtung sind drei Überholabschnitte angeordnet, von denen insgesamt drei untersucht wurden (vgl. Bild A 2.1).

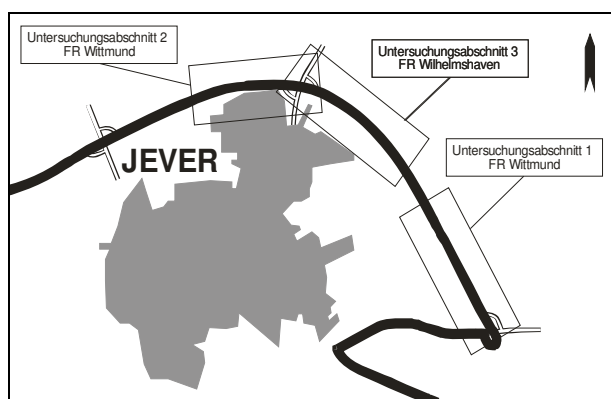


Bild A 2.1: Lageplan Untersuchungsstrecke 1, B 210 OU Jever

Alle Untersuchungsabschnitte beginnen mit einer Fahrstreifenaddition. Im Seitenraum dieser Untersuchungsstrecke befindet sich ein Hinweis auf mögliche Geschwindigkeitskontrollen. Der Querschnitt der B 210 ist wie im Bild A 2.2 dargestellt, ausgebildet.

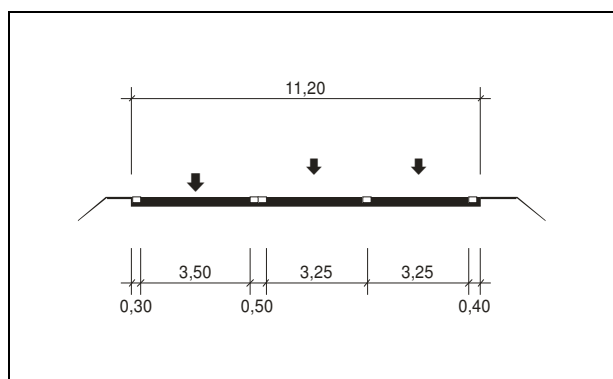


Bild A 2.2: Querschnitt Untersuchungsstrecke 1, B 210 OU Jever

In der Tabelle A 2.1 werden einige Entwurfparameter, die Aufnahmetage und -zeiträume sowie die ausgewerteten Zeiträume für die Untersuchungsstrecken 1 bis 3 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Untersuchungsabschnitte sowie die im Rahmen der empirischen Untersuchungen videotechnisch erfassten Bereiche erfolgt im Bild A 2.3, im Bild A 2.4 und im Bild A 2.5.

Untersuchungs- abschnitt	Länge Untersuchungs- abschnitt	Länge Vorlaufstrecke	Position in Fahrt- richtung	Länge durchgezogene Linie am Beginn	Länge Sperfläche am Ende	Anzahl der einge- setzten Kameras	Aufnahmetag	Aufnahmezeitraum	Auswertezeiträume	Auswertezeit gesamt
	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[Uhrzeit]	[Uhrzeit]	[h]
1	1.474	2.200	1	50	115	5	Donnerstag, 9.10.2003	12.55 – 18.25	14.25 – 15.25 16.05 – 18.05	3,0
2	1.208	1.500	2	50	115	5	Mittwoch, 08.10.2003	13.15 – 19.00	14.10 – 15.10 15.50 – 18.50	4,0
3	1.498	1.100	2	50	115	6	Freitag, 10.10.2003	8.10 – 11.35	8.10 – 9.40 10.15 – 10.45	2,0

Tabelle A 2.1: Entwurfparameter und Aufnahmezeiträume Untersuchungsstrecke 1

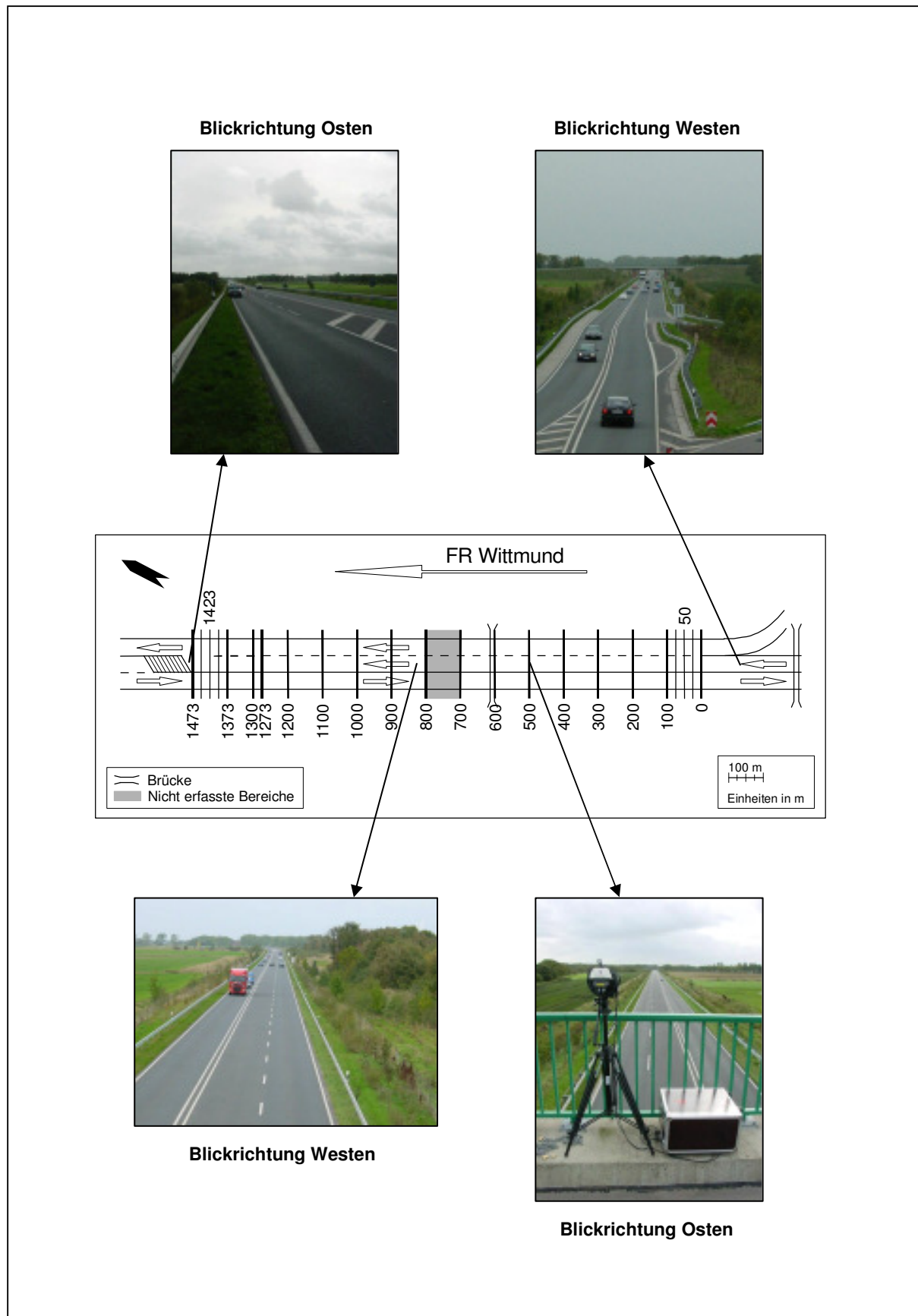


Bild A 2.3: Untersuchungsabschnitt 1

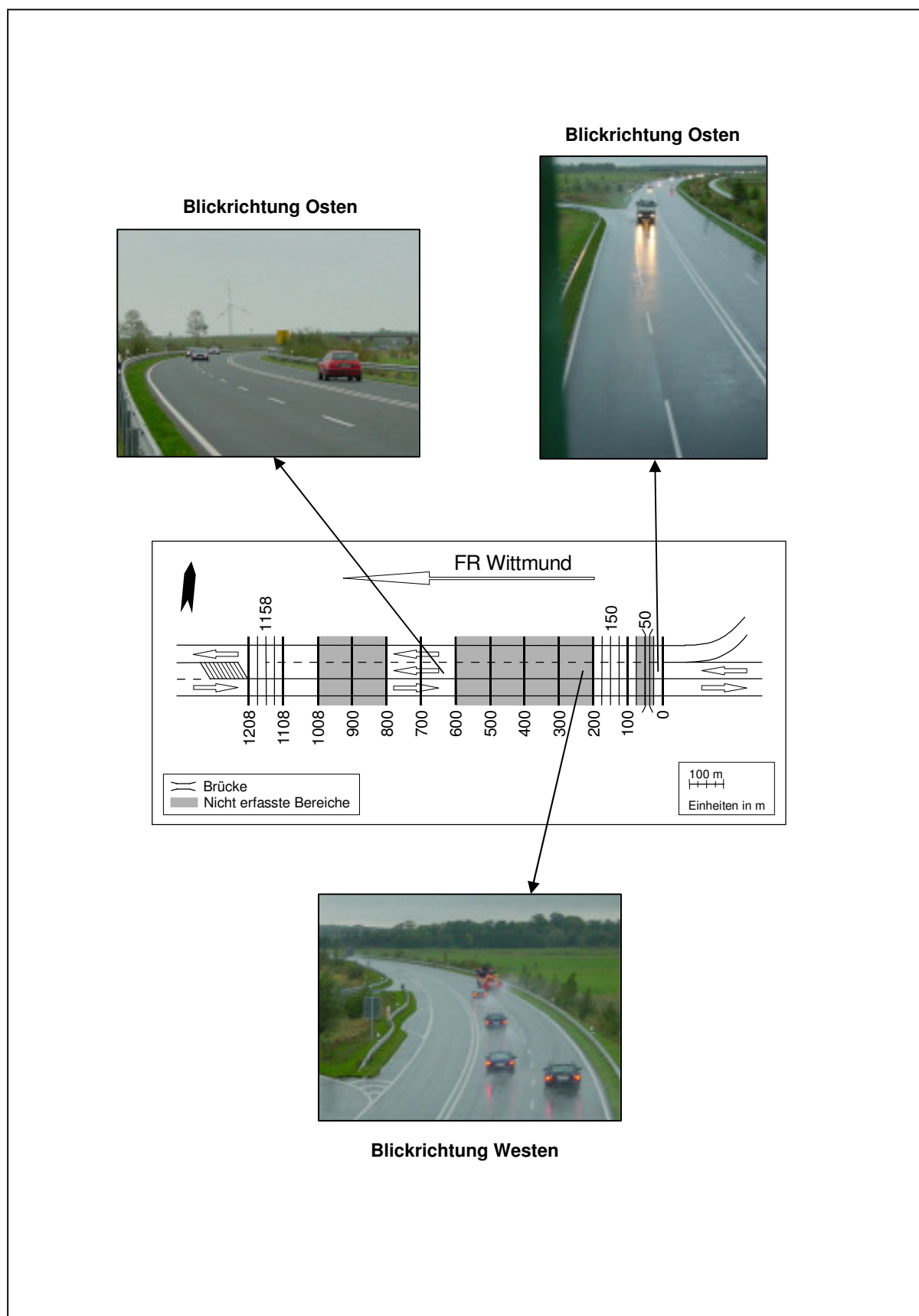


Bild A 2.4: Untersuchungsabschnitt 2

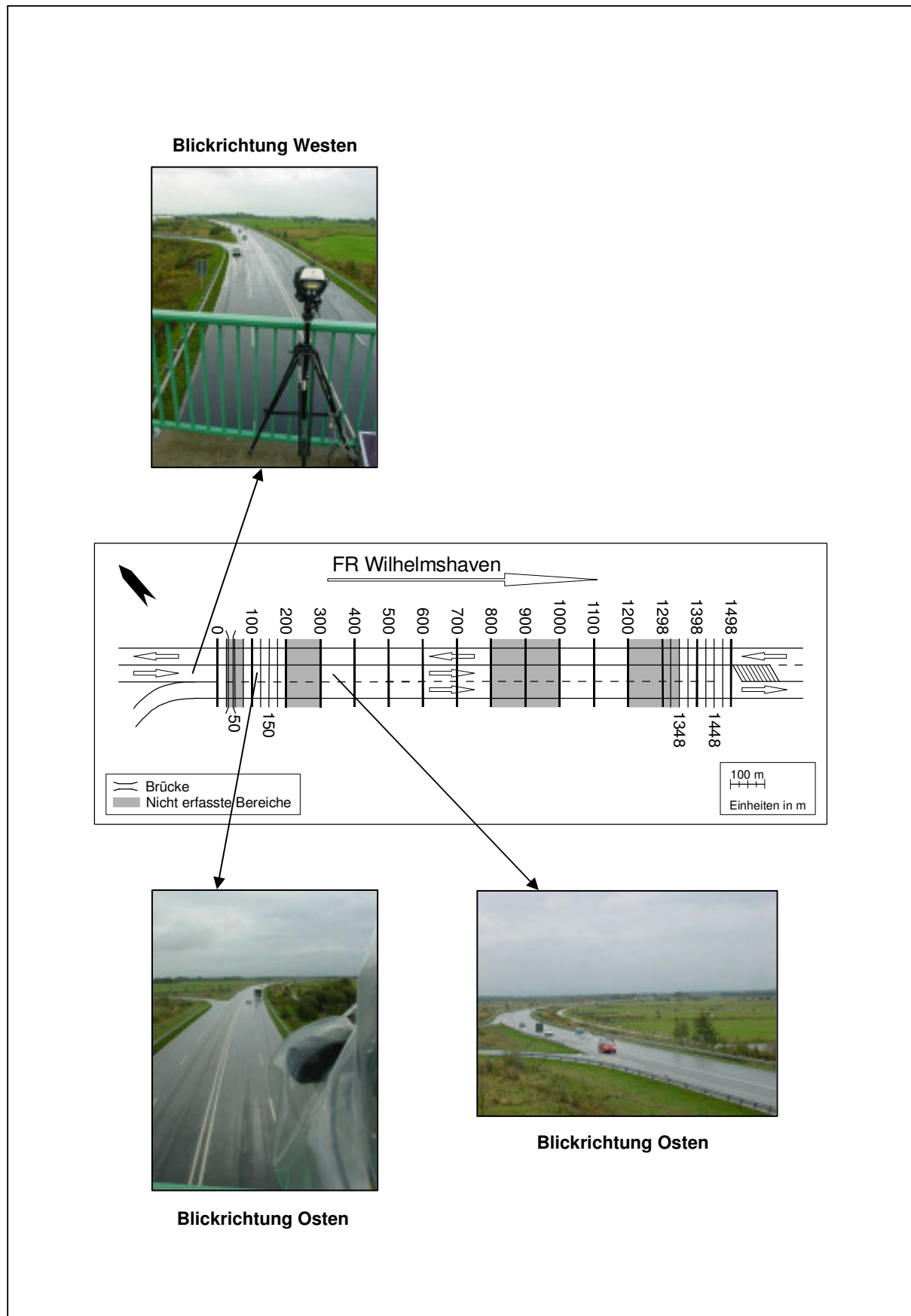


Bild A 2.5: Untersuchungsabschnitt 3

A 2.3 Untersuchungsstrecke 2 (B 62 Kirchhain / Cölbe)

Die untersuchten Abschnitte der B 62 liegen zwischen den Orten Cölbe / Bürgeln und Kirchhain im Raum Marburg in Hessen. Innerhalb der dreistreifigen Untersuchungsstrecke liegen je Fahrtrichtung drei zweistreifige Abschnitte vor. Im Rahmen der empirischen Untersuchungen wurden von diesen sechs Abschnitten drei untersucht (vgl. Bild A 2.6).

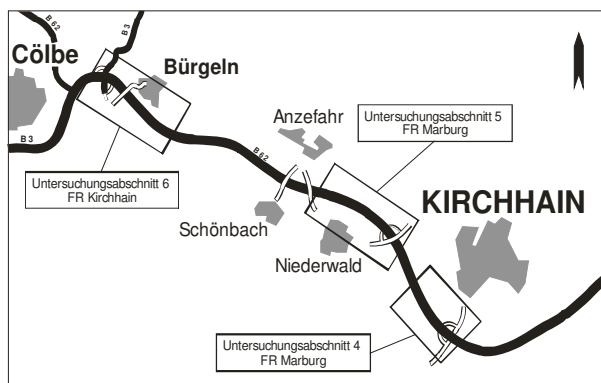


Bild A 2.6: Lageplan Untersuchungsstrecke 2, B 62 Kirchhain / Cölbe

Die betrachteten Abschnitte beginnen mit einer Fahrstreifenaddition. Am Ende der Untersuchungsabschnitte sind jeweils Überholverbote angeordnet. Der Querschnitt der B 62 ist, wie im Bild A 2.7 dargestellt, ausgebildet.

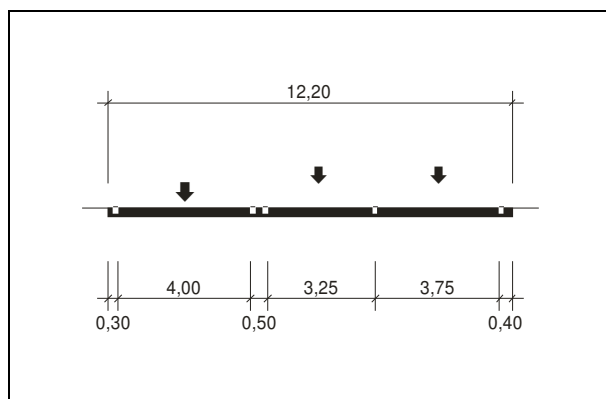


Bild A 2.7: Querschnitt Untersuchungsstrecke 2, B 62 Kirchhain / Cölbe

In der Tabelle A 2.2 werden einige Entwurfparameter, die Aufnahmetage und -zeiträume sowie die ausgewerteten Zeiträume für die Untersuchungsstrecken 4 bis 6 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Untersuchungsabschnitte sowie die im Rahmen der empirischen Untersuchungen videotechnisch erfassten Bereiche erfolgt im Bild A 2.8, im Bild A 2.9 und im Bild A 2.10.

Untersuchungs- abschnitt	Länge Untersuchungs- abschnitt	Länge Vorlaufstrecke	Position in Fahrt- richtung	Länge durchgezogene Linie am Beginn	Länge Sperfläche am Ende	Anzahl der einge- setzten Kameras	Aufnahmetag	Aufnahmezeitraum	Auswertezeiträume	Auswertezeit gesamt
	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[Uhrzeit]	[Uhrzeit]	[h]
4	1.092	2.000	1	60	180	4	Dienstag, 14.10.2003	13.15 – 19.00	14.15 – 15.45 16.15 – 18.45	4,0
5	1.687	1.400	2	65	200	6	Donnerstag, 16.10.2003	13.00 – 18.50	14.15 – 15.45 15.55 – 18.25	4,0
6	1.706	500	1	45	195	7	Mittwoch, 15.10.2003	13.20 – 19.00	13.20 – 13.50 14.25 – 15.25 16.10 – 18.40	4,0

Tabelle A 2.2: Entwurfsparameter und Aufnahmezeiträume Untersuchungsstrecke 2

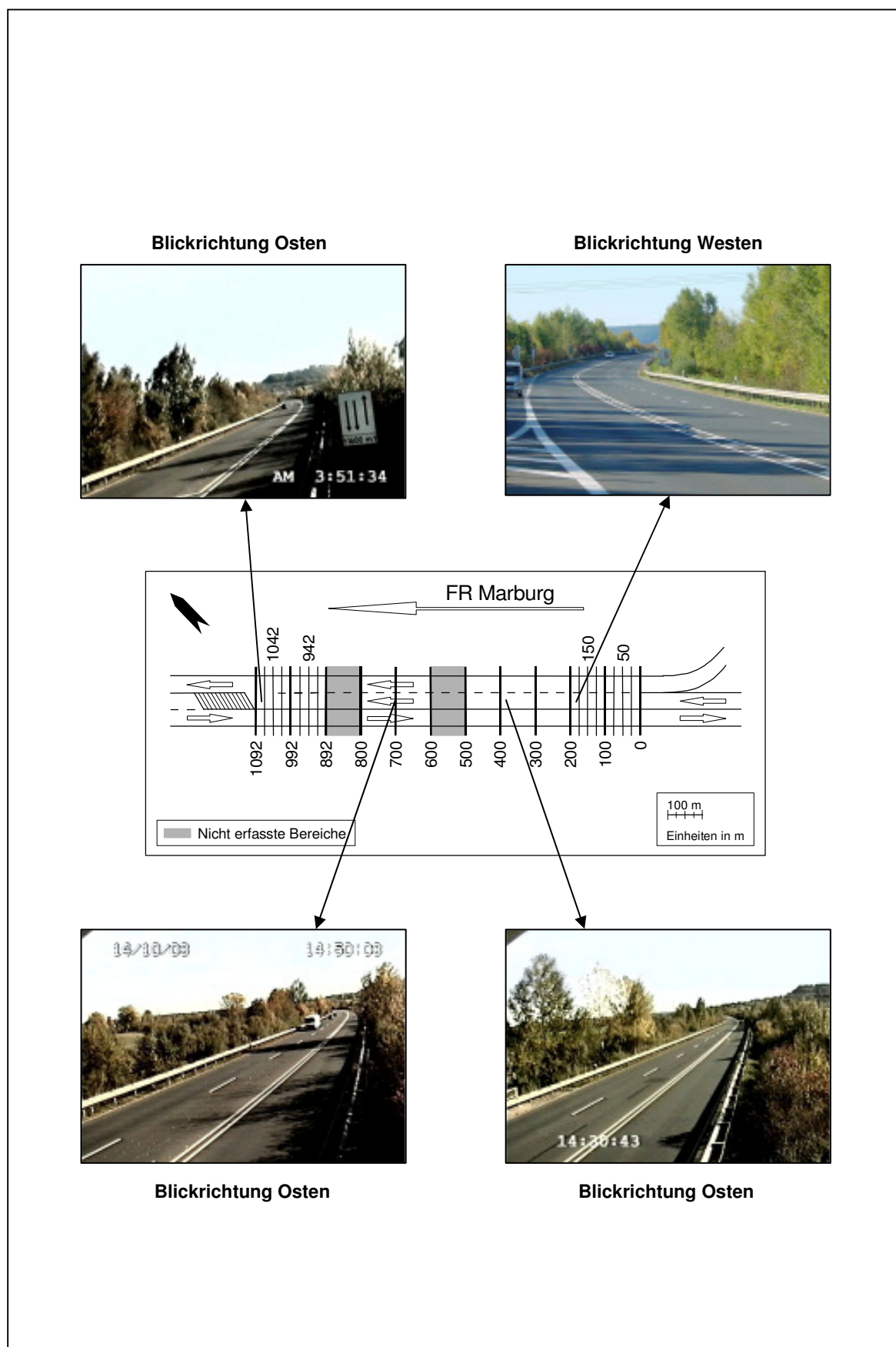


Bild A 2.8: Untersuchungsabschnitt 4

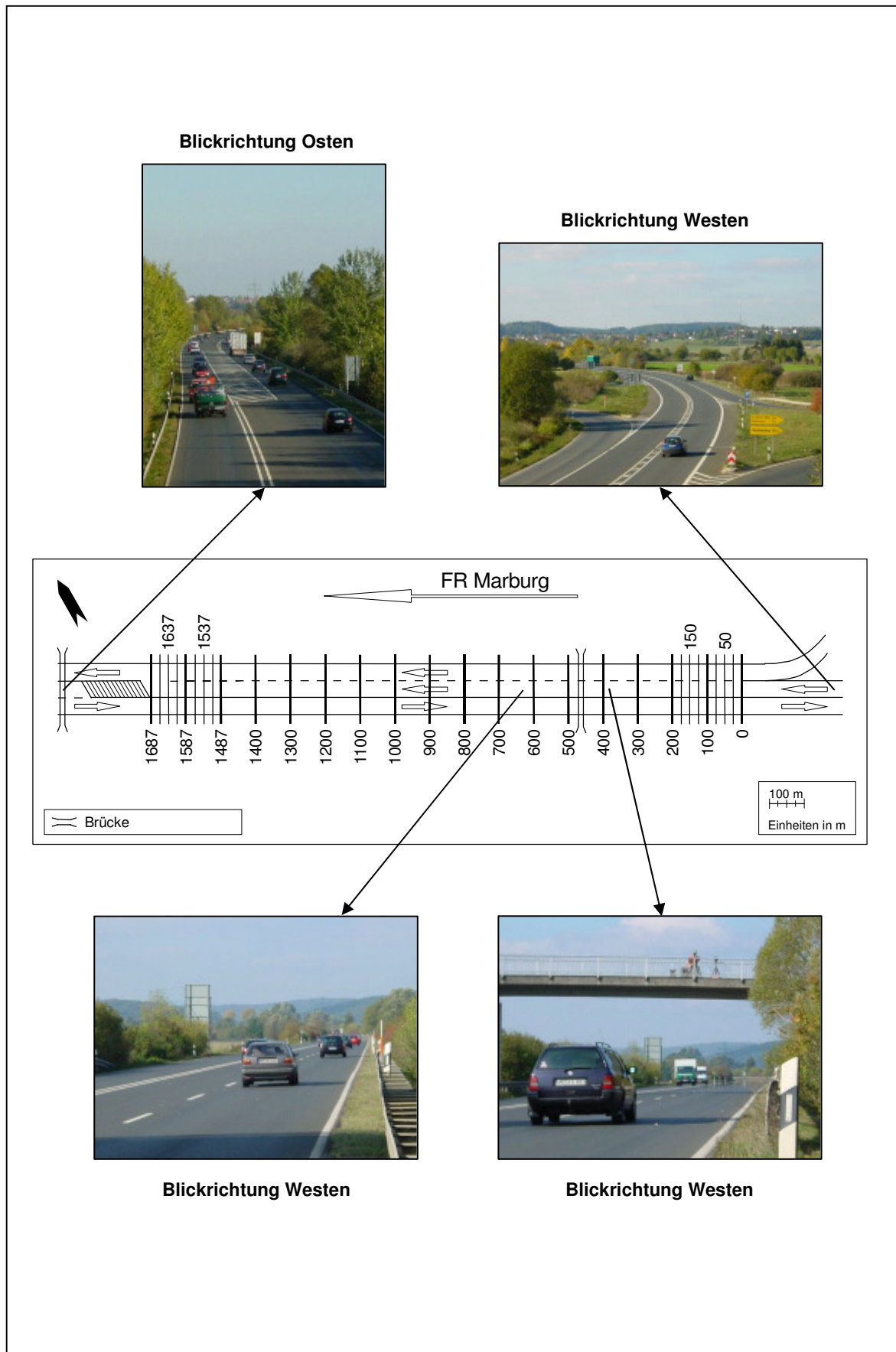


Bild A 2.9: Untersuchungsabschnitt 5

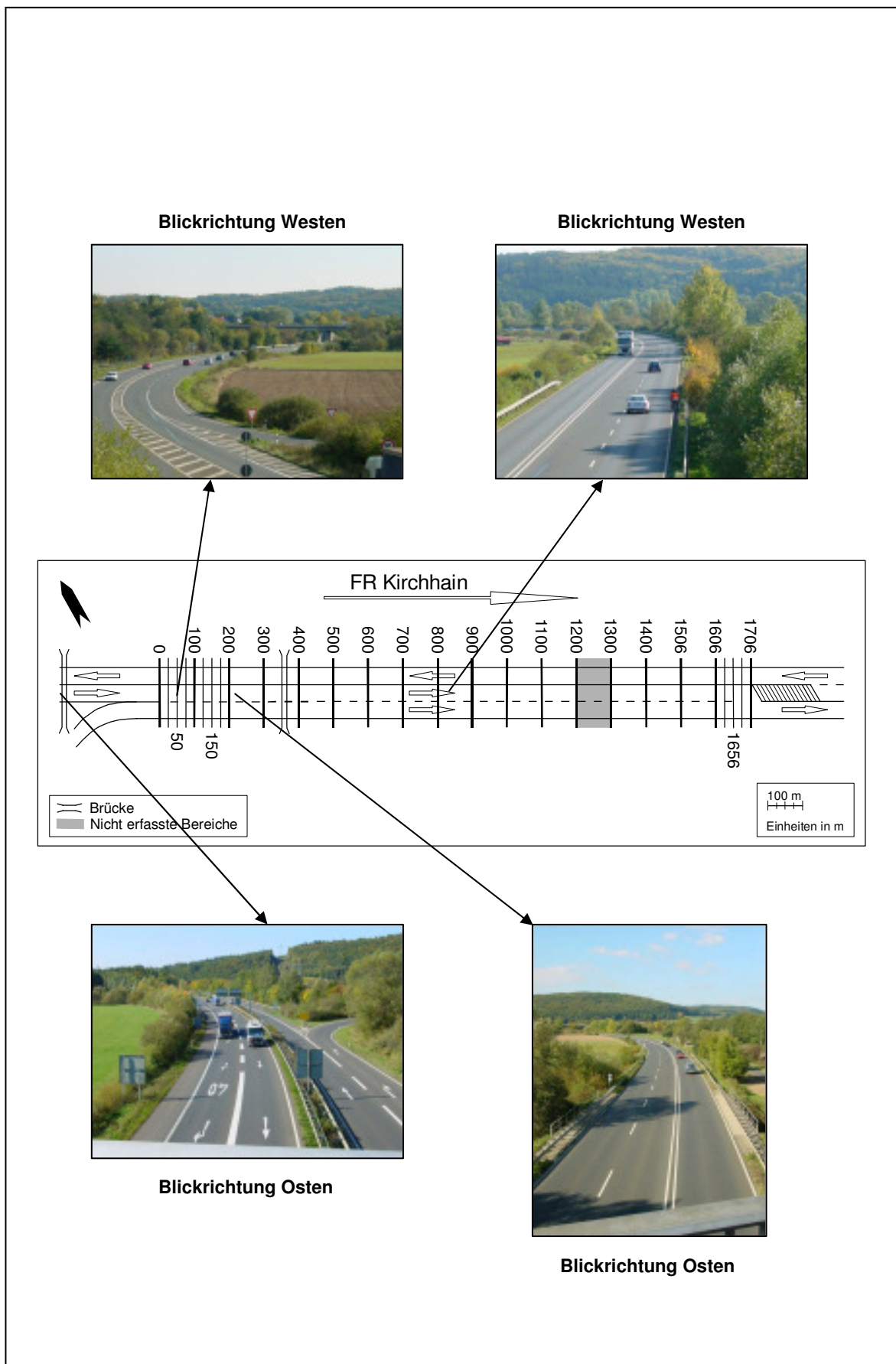


Bild A 2.10: Untersuchungsabschnitt 6

A 2.4 Untersuchungsstrecke 3 (B 1 Paderborn / Schlangen)

Die untersuchten Abschnitte der B 1 liegen zwischen den Orten Paderborn und Schlangen in Nordrhein-Westfalen. Innerhalb der dreistreifigen Untersuchungsstrecke liegen je Fahrtrichtung vier Überholabschnitte vor. Im Rahmen der empirischen Untersuchungen wurden von diesen Abschnitten drei untersucht (vgl. Bild A 2.6).

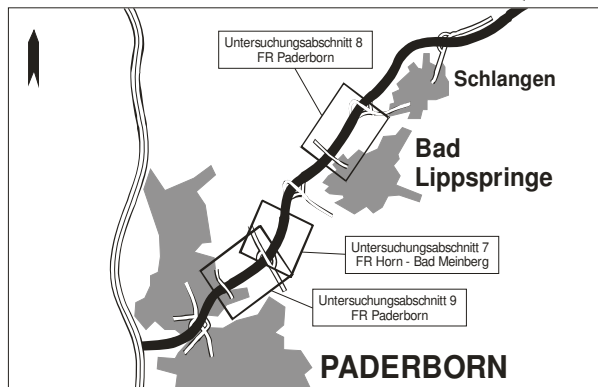


Bild A 2.11: Lageplan Untersuchungsstrecke 3, B 1 Paderborn / Schlangen

Die drei betrachteten Abschnitte beginnen mit einer Fahrstreifenaddition. Am Ende der Untersuchungsabschnitte sind jeweils Überholverbote angeordnet. Darüber hinaus weisen alle Untersuchungsabschnitte Lkw-Überholverbote auf. Der Querschnitt der B 1 ist, wie im Bild A 2.12 dargestellt, ausgebildet.

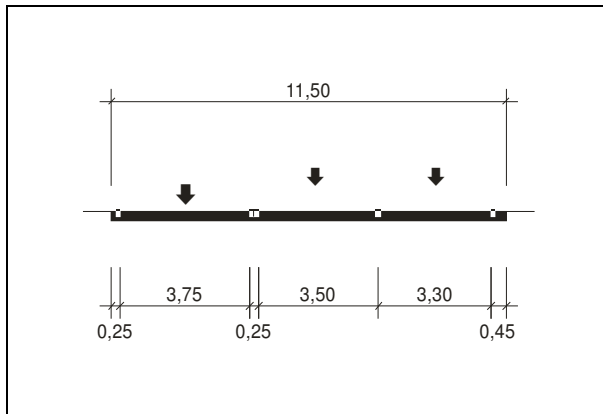


Bild A 2.12: Querschnitt Untersuchungsstrecke 3, B 1 Paderborn / Schlangen

In der Tabelle A 2.3 werden einige Entwurfparameter, die Aufnahmetage und -zeiträume sowie die ausgewerteten Zeiträume für die Untersuchungsstrecken 7 bis 9 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Untersuchungsabschnitte sowie die im Rahmen der empirischen Untersuchungen videotechnisch erfassten Bereiche erfolgt im Bild A 2.13, im Bild A 2.14 und im Bild A 2.15.

Untersuchungs- abschnitt	Länge Untersuchungs- abschnitt	Länge Vorlaufstrecke	Position in Fahrt- richtung	Länge durchgezogene Linie am Beginn	Länge Sperrfläche am Ende	Anzahl der einge- setzten Kameras	Aufnahmetag	Aufnahmezeitraum	Auswerteziträume	Auswertzeit gesamt
	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[Uhrzeit]	[Uhrzeit]	[h]
7	828	1.800	3	55	130	4	Mittwoch, 31.03.2004	14.55 – 19.05	14.55 – 18.55	4,0
8	1.403	3.500	1	60	130	5	Donnerstag, 01.04.2004	6.50 – 11.05	6.50 – 10.50	4,0
9	1.195	1.400	3	60	130	5	Freitag, 02.04.2004	6.35 – 10.45	6.50 – 10.20	3,5

Tabelle A 2.3: Entwurfsparameter und Aufnahmezeiträume Untersuchungsstrecke 3

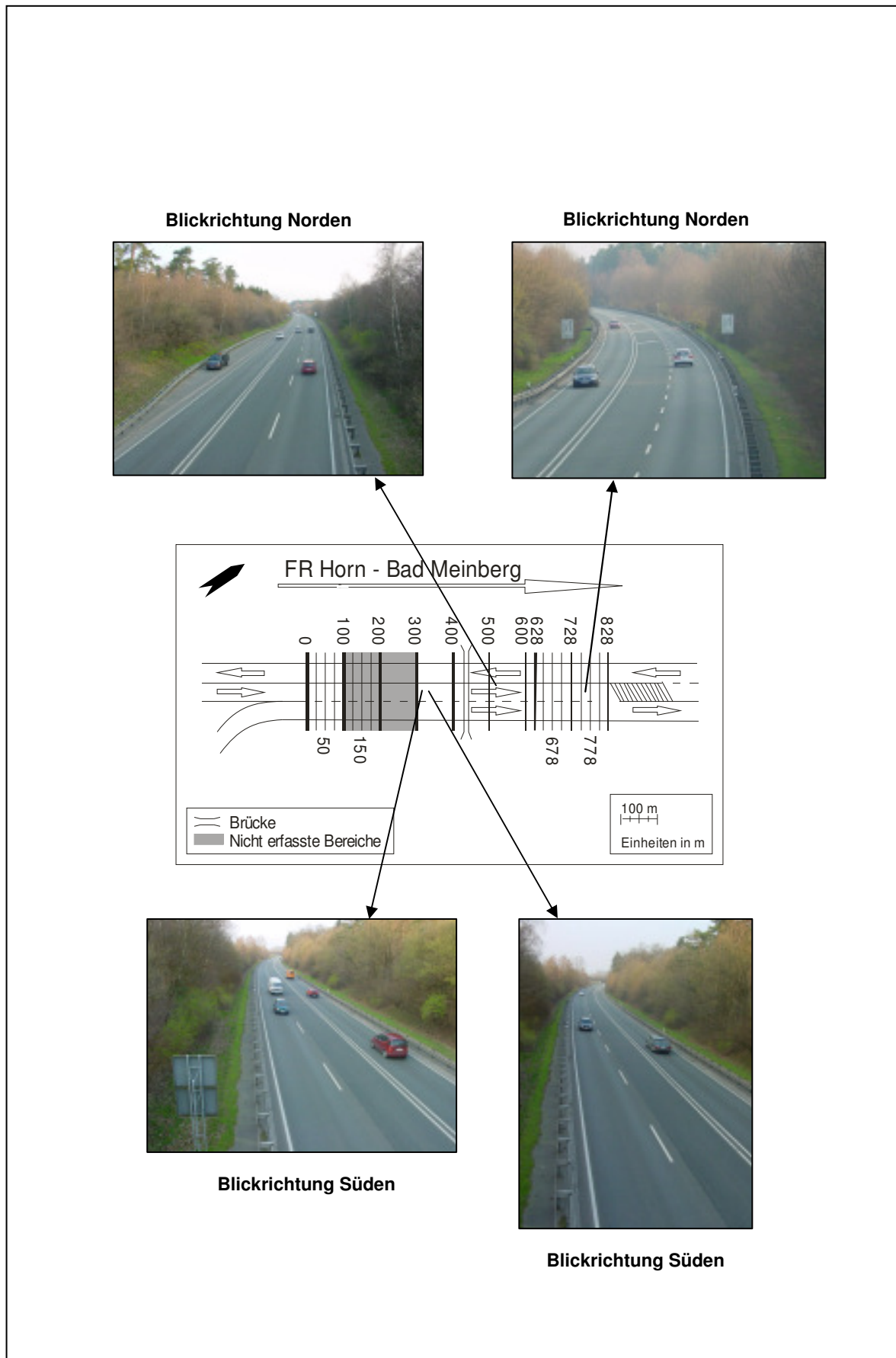


Bild A 2.13: Untersuchungsabschnitt 7

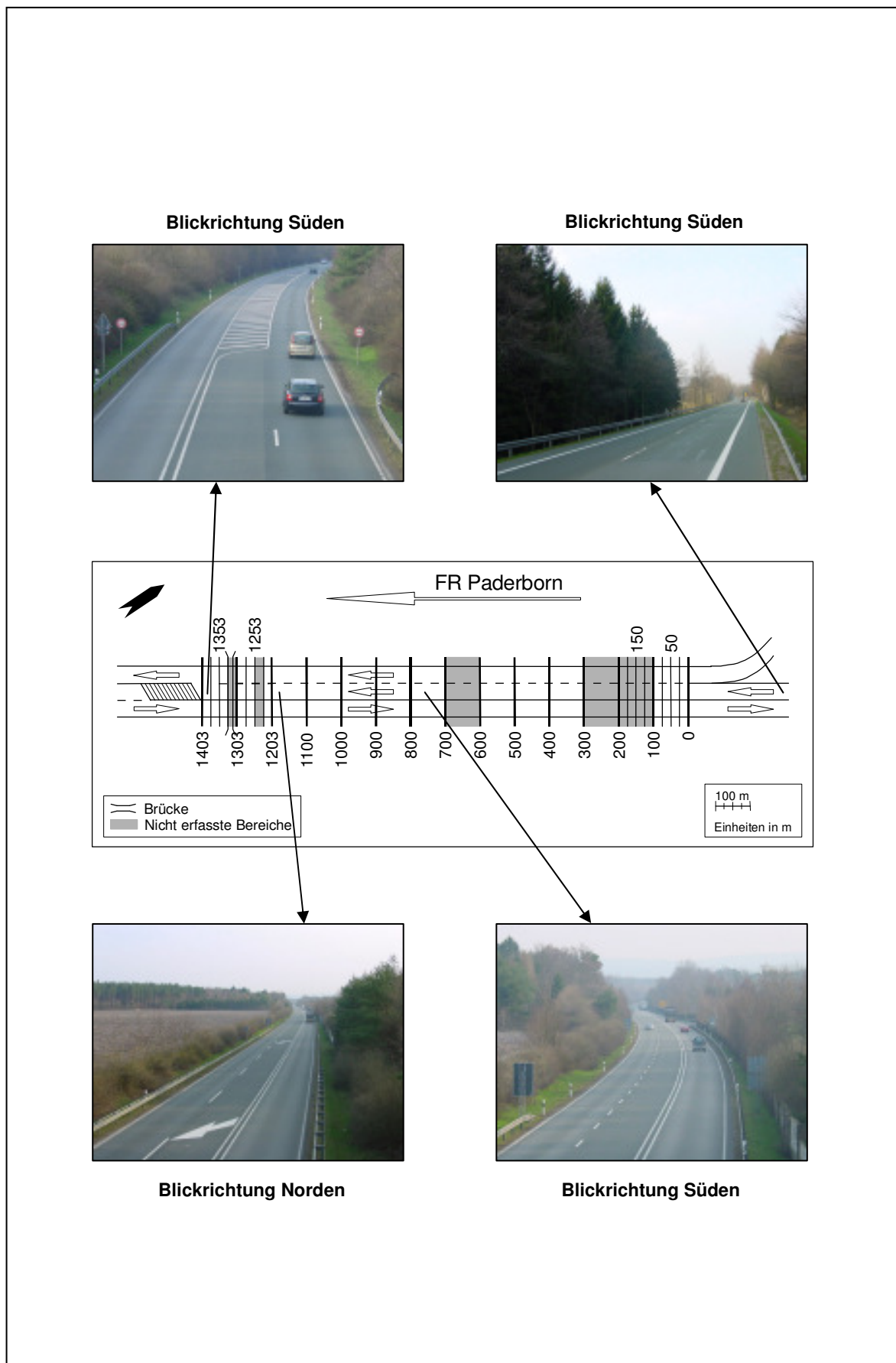


Bild A 2.14: Untersuchungsabschnitt 8

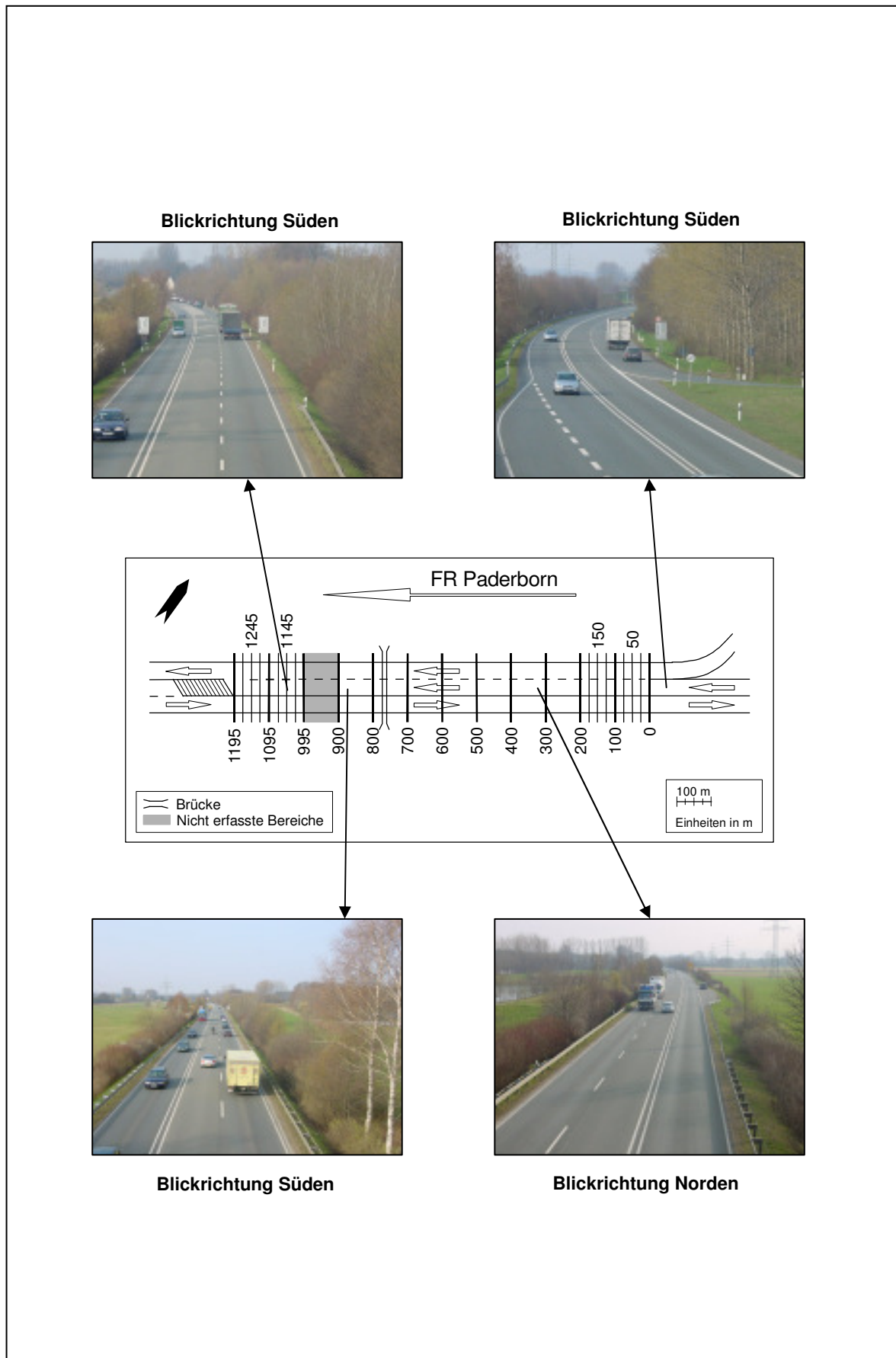


Bild A 2.15: Untersuchungsabschnitt 9

A 2.5 Untersuchungsstrecke 4 (B 49 Niederbiel / Leun)

Die untersuchten Abschnitte der B 49 liegen zwischen den Orten Wetzlar und Löhnberg in Hessen. Innerhalb der dreistreifigen Untersuchungsstrecke liegen je Fahrtrichtung zwei Überholabschnitte vor. Im Rahmen der empirischen Untersuchungen wurden von diesen Abschnitten zwei untersucht (vgl. Bild A 2.16).

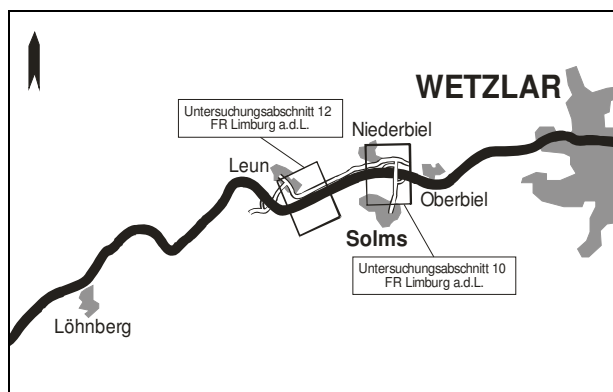


Bild A 2.16: Lageplan Untersuchungsstrecke 4, B 49 Niederbiel / Leun

Einer der beiden betrachteten Abschnitte beginnt mit einer Fahrstreifenaddition (Untersuchungsabschnitt 10). Der zweite Abschnitt beginnt hingegen mit einem unkritischen Wechsel (Untersuchungsabschnitt 12). Am Ende der Untersuchungsabschnitte sind jeweils Überholverbote angeordnet. Darüber hinaus weisen alle Untersuchungsabschnitte Lkw-Überholverbote auf. Der Querschnitt der B 49 ist, wie im Bild A 2.17 dargestellt, ausgebildet.

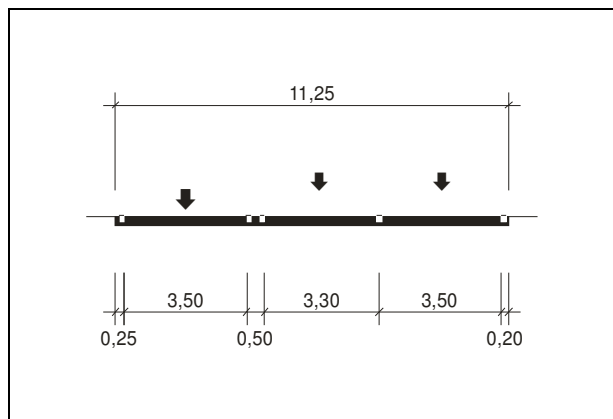


Bild A 2.17: Querschnitt Untersuchungsstrecke 4, B 49 Niederbiel / Leun

In der Tabelle A 2.4 werden einige Entwurfparameter, die Aufnahmetage und -zeiträume sowie die ausgewerteten Zeiträume für die Untersuchungsstrecken 10 und 12 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Untersuchungsabschnitte sowie die im Rahmen der empirischen Untersuchungen videotechnisch erfassten Bereiche erfolgt im Bild A 2.18 und im Bild A 2.19.

Untersuchungs- abschnitt	Länge Untersuchungs- abschnitt	Länge Vorlaufstrecke	Position in Fahrt- richtung	Länge durchgezogene Linie am Beginn	Länge Sperrfläche am Ende	Anzahl der einge- setzten Kameras	Aufnahmetag	Aufnahmezeitraum	Auswertezeiträume	Auswertezeit gesamt
	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[Uhrzeit]	[Uhrzeit]	[h]
10	895	2.600	1	60	160		Mittwoch, 02.06.2004	14.30 – 19.00	14.45 – 18.45	4,0
12	929	1.200	2	45	182		Donnerstag, 03.06.2004	14.30 – 18.25	14.45 – 18.15	3,5

Tabelle A 2.4: Entwurfsparameter und Aufnahmezeiträume Untersuchungsstrecke 4

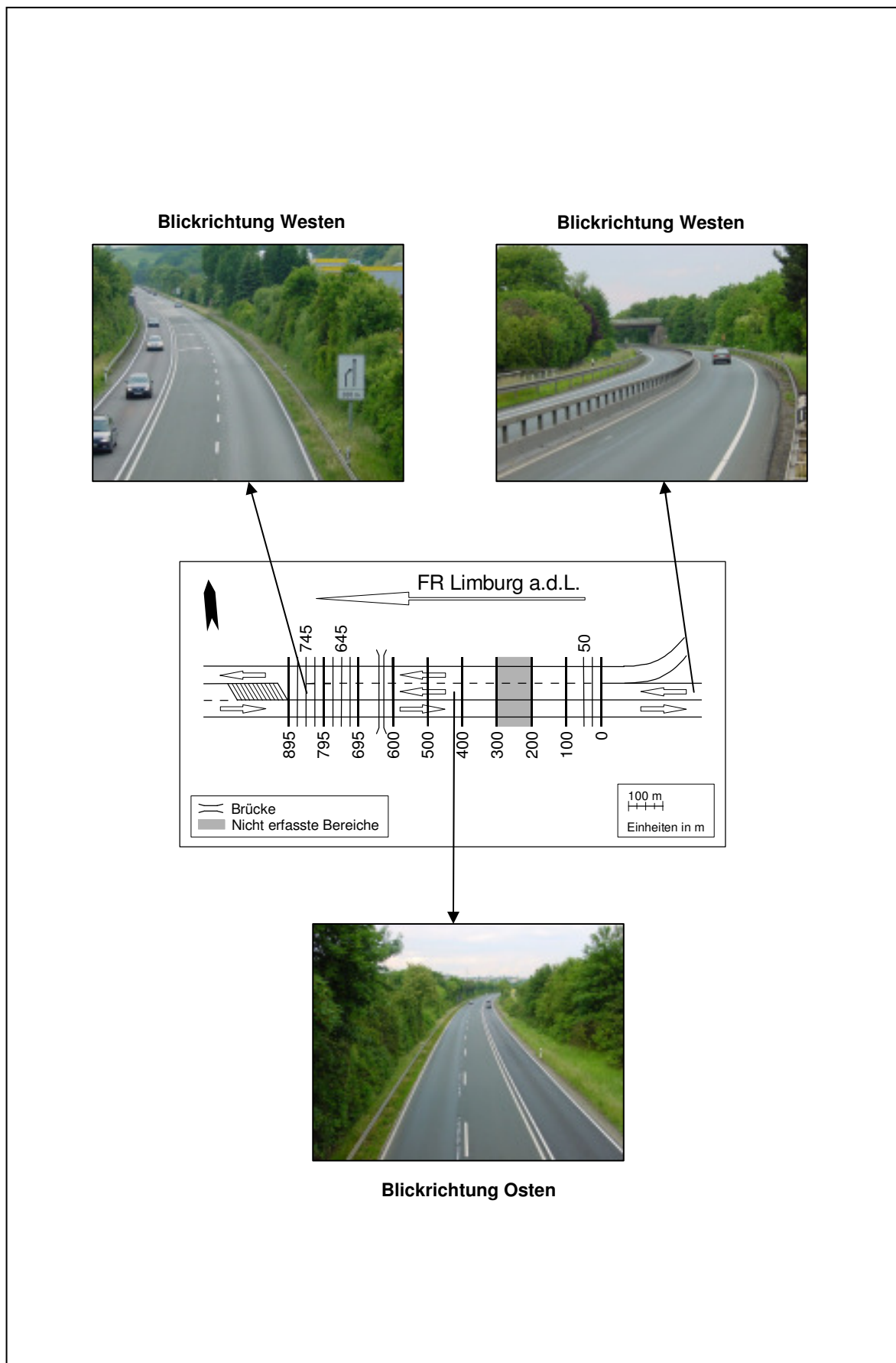


Bild A 2.18: Untersuchungsabschnitt 10

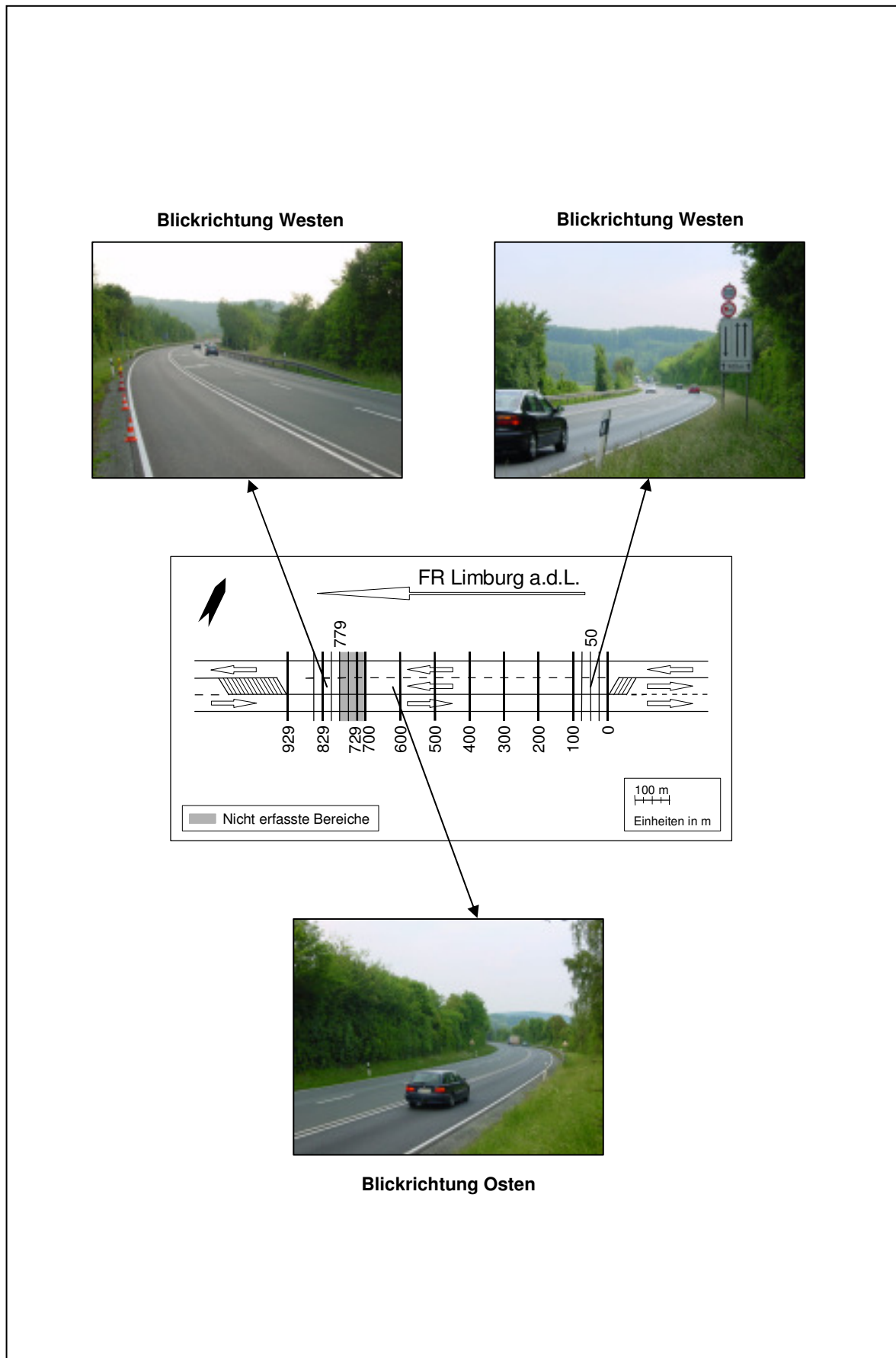


Bild A 2.19: Untersuchungsabschnitt 12

A 2.6 Untersuchungsstrecke 5 (B 20 OU Straubing)

Die B 20 bildet im betrachteten Teilstück die Nord-Süd Umgehung von Straubing zwischen den Orten Steinach und Aiterhofen (vgl. Bild A 2.20).

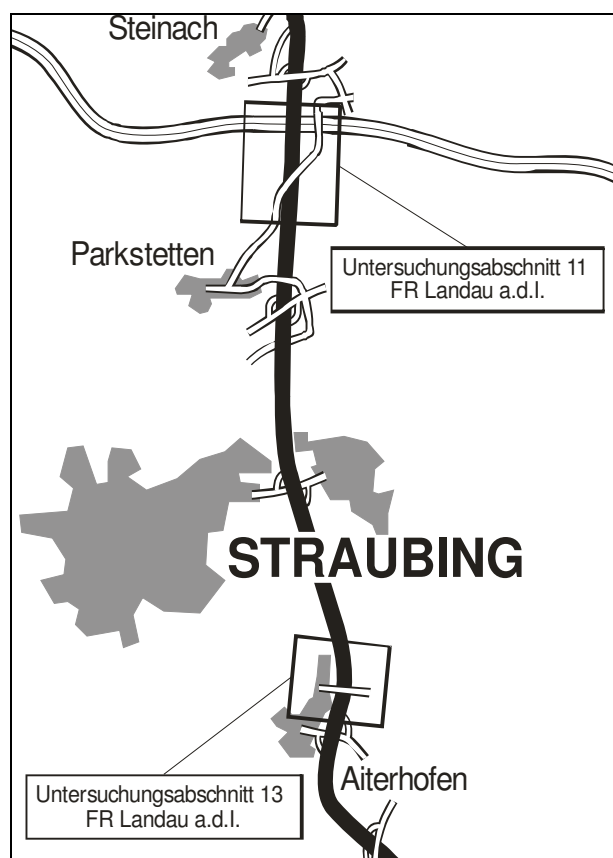


Bild A 2.20: Lageplan Untersuchungsstrecke 5, B 20 OU Straubing

Innerhalb der dreistreifigen Untersuchungsstrecke liegen insgesamt sieben Überholabschnitte vor. Im Rahmen der empirischen Untersuchungen wurden von diesen Abschnitten zwei untersucht. Einer der beiden betrachteten Abschnitte beginnt mit einer Fahrstreifenaddition (Untersuchungsabschnitt 11). Der zweite Abschnitt beginnt hingegen mit einem unkritischen Wechsel (Untersuchungsabschnitt 13). Am Ende der Untersuchungsabschnitte sind jeweils Überholverbote angeordnet. Der Querschnitt der B 20 ist, wie im Bild A 2.21 dargestellt, ausgebildet.

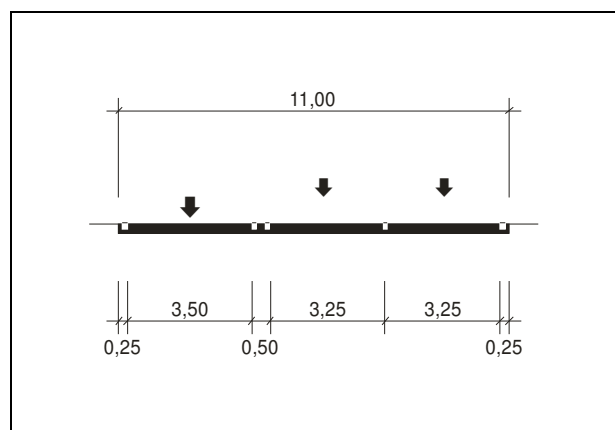


Bild A 2.21: Querschnitt Untersuchungsstrecke 5, B 20 OU Straubing

In der Tabelle A 2.5 werden einige Entwurfparameter, die Aufnahmetage und -zeiträume sowie die ausgewerteten Zeiträume für die Untersuchungsstrecken 11 und 13 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Untersuchungsabschnitte sowie die im Rahmen der empirischen Untersuchungen videotechnisch erfassten Bereiche erfolgt im Bild A 2.22 und im Bild A 2.23.

Untersuchungs- abschnitt	Länge Untersuchungs- abschnitt	Länge Vorlaufstrecke	Position in Fahrt- richtung	Länge durchgezogene Linie am Beginn	Länge Sperfläche am Ende	Anzahl der einge- setzten Kameras	Aufnahmetag	Aufnahmezeitraum	Auswerteziträume	Auswertzeit gesamt
	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[Uhrzeit]	[Uhrzeit]	[h]
11	1.296	1.200	1	75	150	5	Dienstag, 22.06.2004	7.10 – 11.25	7.20 – 11.20	4,0
13	1.146	1.200	4	45	182	4	Mittwoch, 23.06.2004	6.15 – 10.30	6.35 – 10.05	3,5

Tabelle A 2.5: Entwurfparameter und Aufnahmezeiträume Untersuchungsstrecke 5

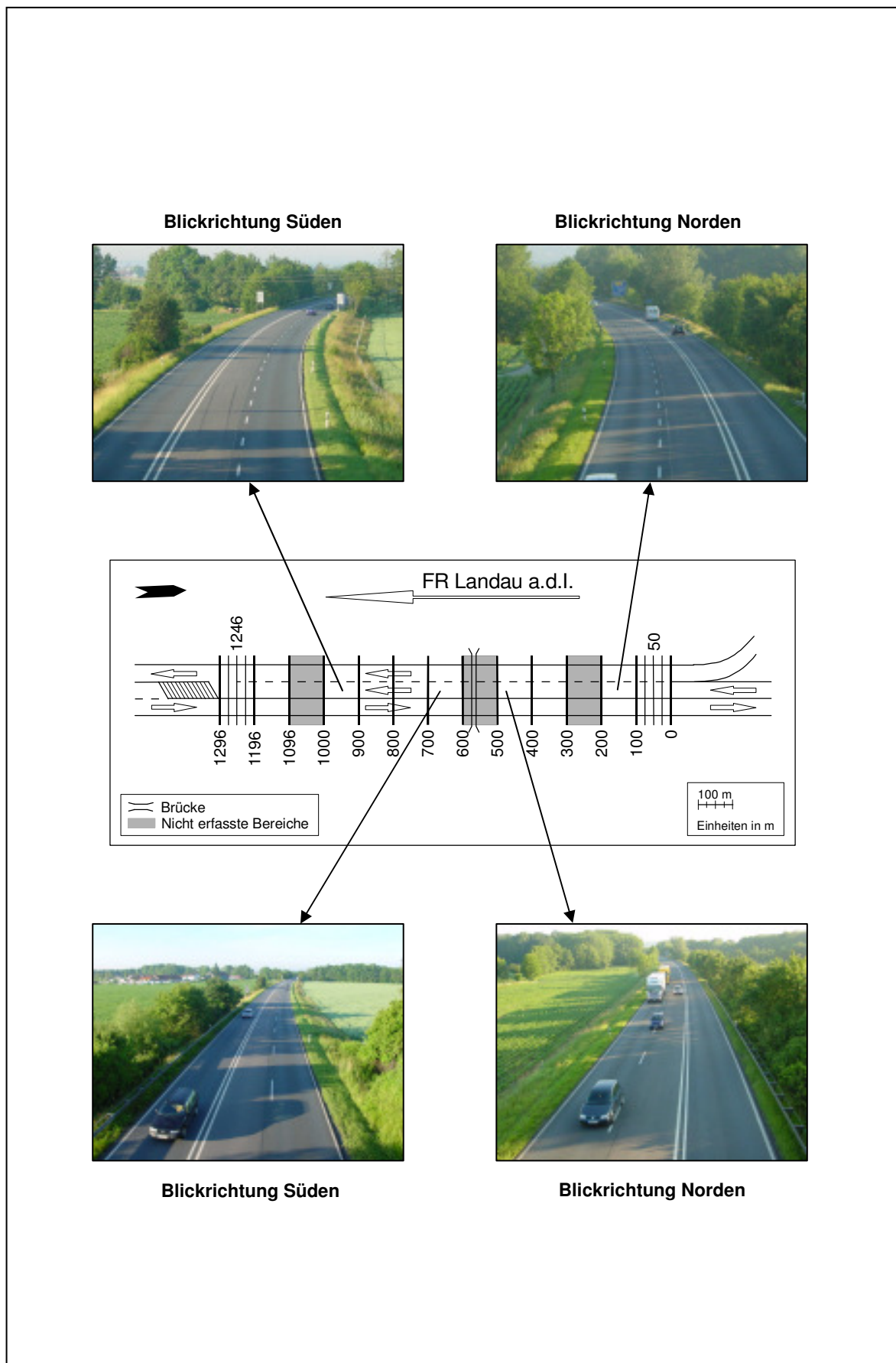


Bild A 2.22: Untersuchungsabschnitt11

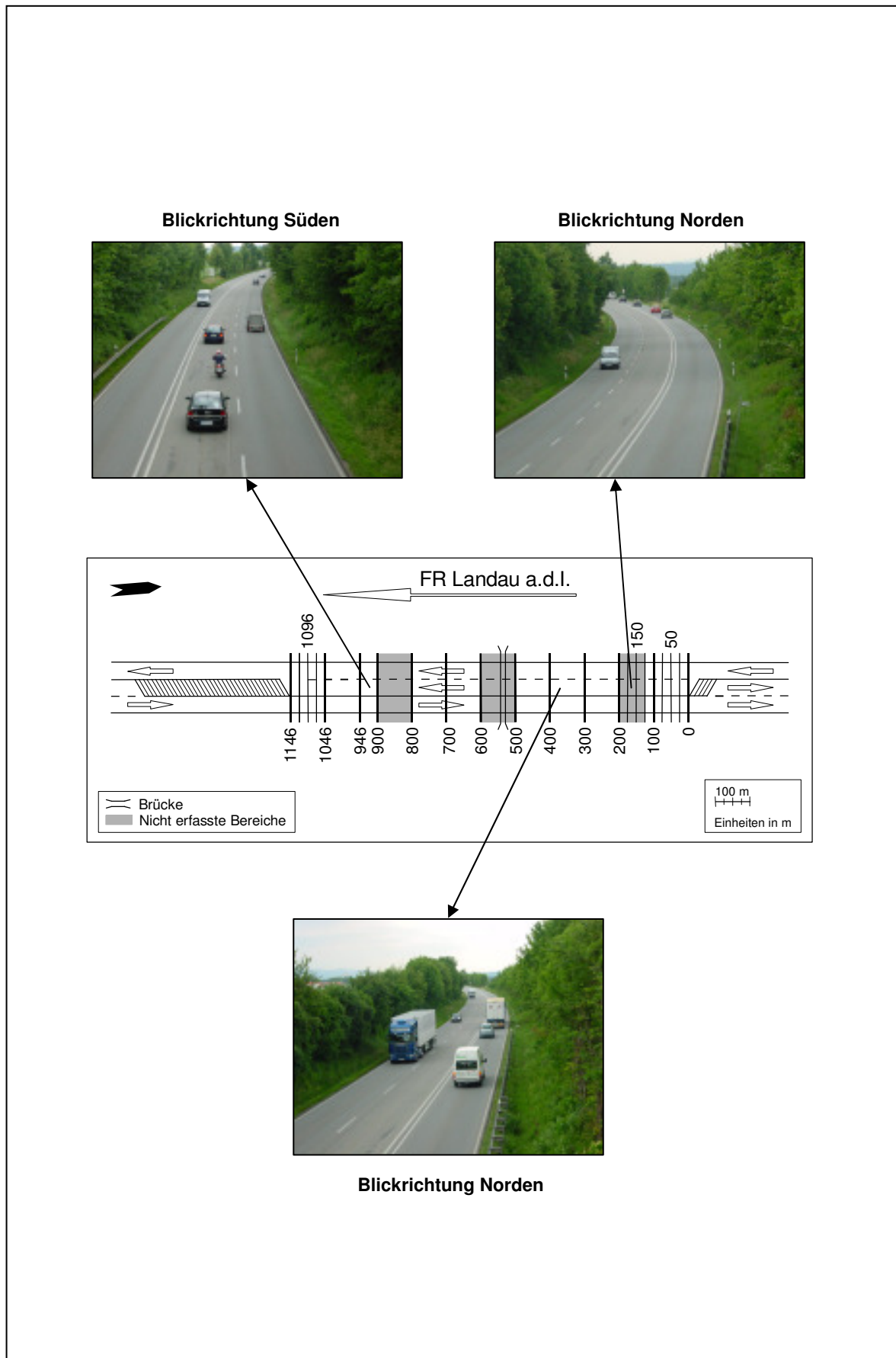


Bild A 2.23: Untersuchungsabschnitt 13

A 2.7 Untersuchungsstrecke 6 (B 471 OU Dachau)

Die B 471 bildet im betrachteten Abschnitt die Ost-West Umgehung von Dachau in Bayern. Innerhalb der dreistreifigen Untersuchungsstrecke liegen je Fahrtrichtung zwei Überholabschnitte vor. Im Rahmen der empirischen Untersuchungen wurden von diesen Abschnitten zwei untersucht (vgl. Bild A 2.24).

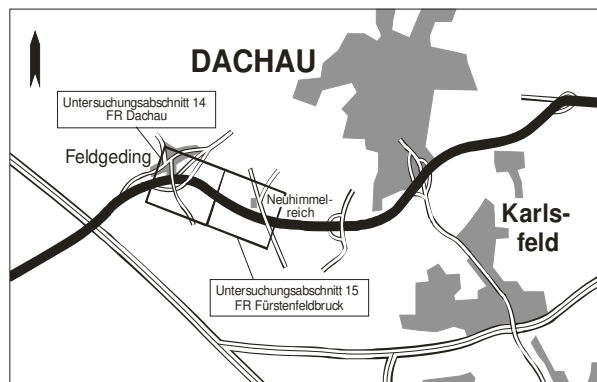


Bild A 2.24: Lageplan Untersuchungsstrecke 5, B 471 OU Dachau

Beide betrachteten Abschnitte (Untersuchungsabschnitt 14 und 15) beginnen mit einem unkritischen Wechsel. Am Ende der Untersuchungsabschnitte sind jeweils Überholverbote angeordnet. Der Querschnitt der B 471 ist, wie im Bild A 2.21 dargestellt, ausgebildet.

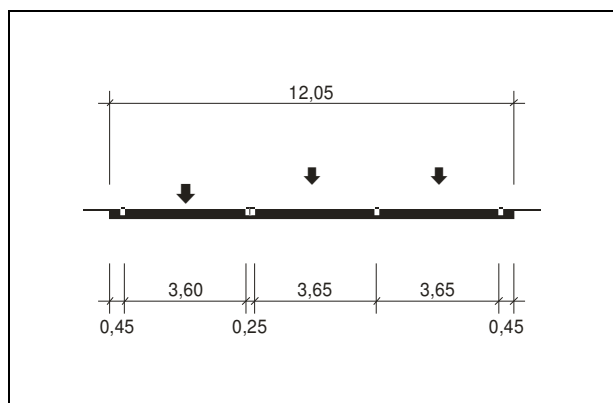


Bild A 2.25: Querschnitt Untersuchungsstrecke 6, B 471 OU Dachau

In der Tabelle A 2.6 werden einige Entwurfparameter, die Aufnahmetage und -zeiträume sowie die ausgewerteten Zeiträume für die Untersuchungsstrecken 14 und 15 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Untersuchungsabschnitte sowie die im Rahmen der empirischen Untersuchungen videotechnisch erfassten Bereiche erfolgt im Bild A 2.26 und im Bild A 2.27.

Untersuchungs- abschnitt	Länge Untersuchungs- abschnitt	Länge Vorlaufstrecke	Position in Fahrt- richtung	Länge durchgezogene Linie am Beginn	Länge Sperrfläche am Ende	Anzahl der einge- setzten Kameras	Aufnahmetag	Aufnahmezeitraum	Auswertezeiträume	Auswertezeit gesamt
	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[Uhrzeit]	[Uhrzeit]	[h]
14	1.258	1.500	1	-	212	4	Donnerstag, 24.06.2004	14:35 – 19.00	14.50 – 18.50	4,0
15	1.353	1.600	2	40	212	5	Freitag, 25.06.2004	13.10 – 17.15	13.10 – 17.10	4,0

Tabelle A 2.6: Entwurfsparameter und Aufnahmezeiträume Untersuchungsstrecke 6

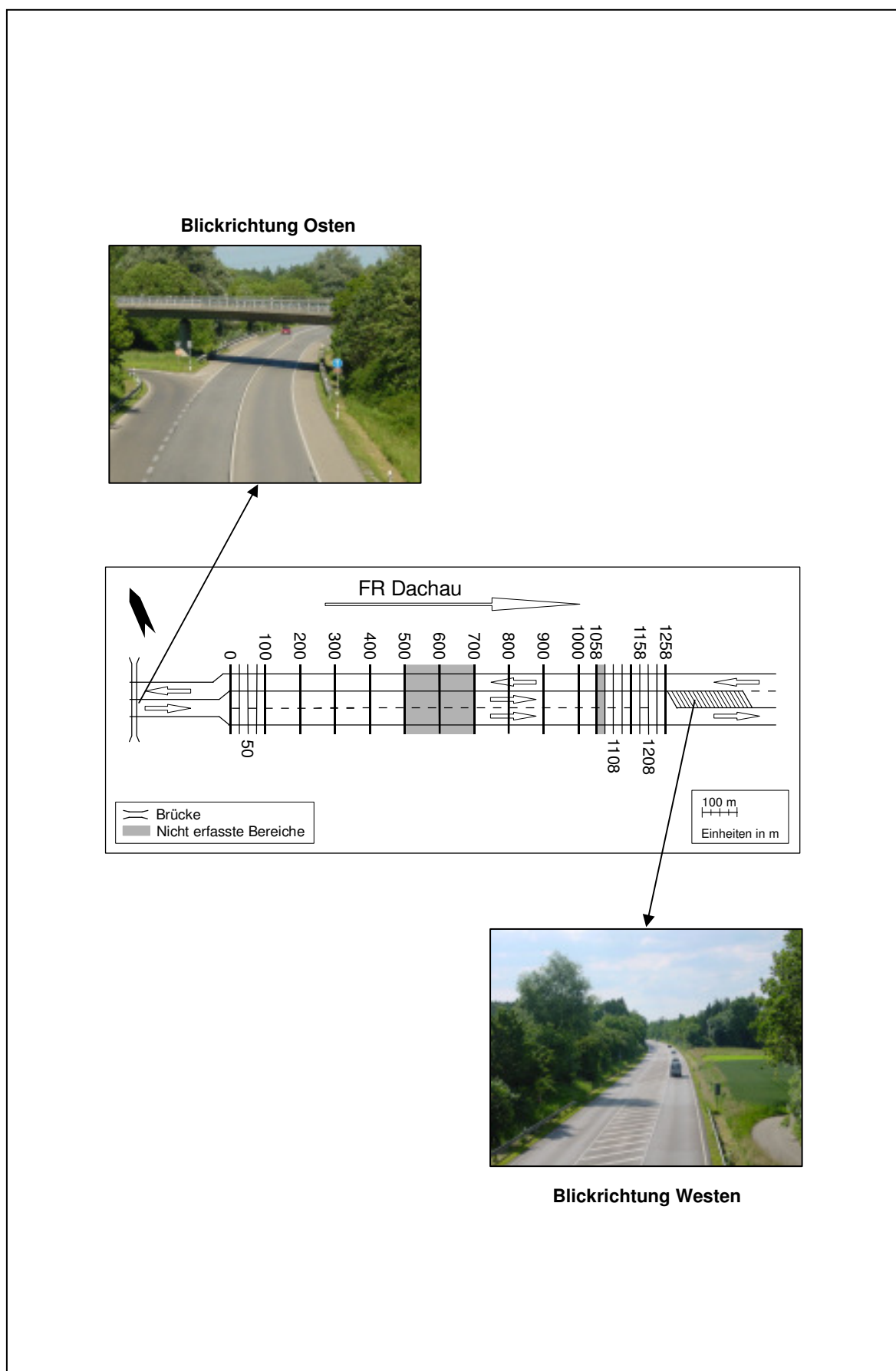


Bild A 2.26: Untersuchungsabschnitt 14

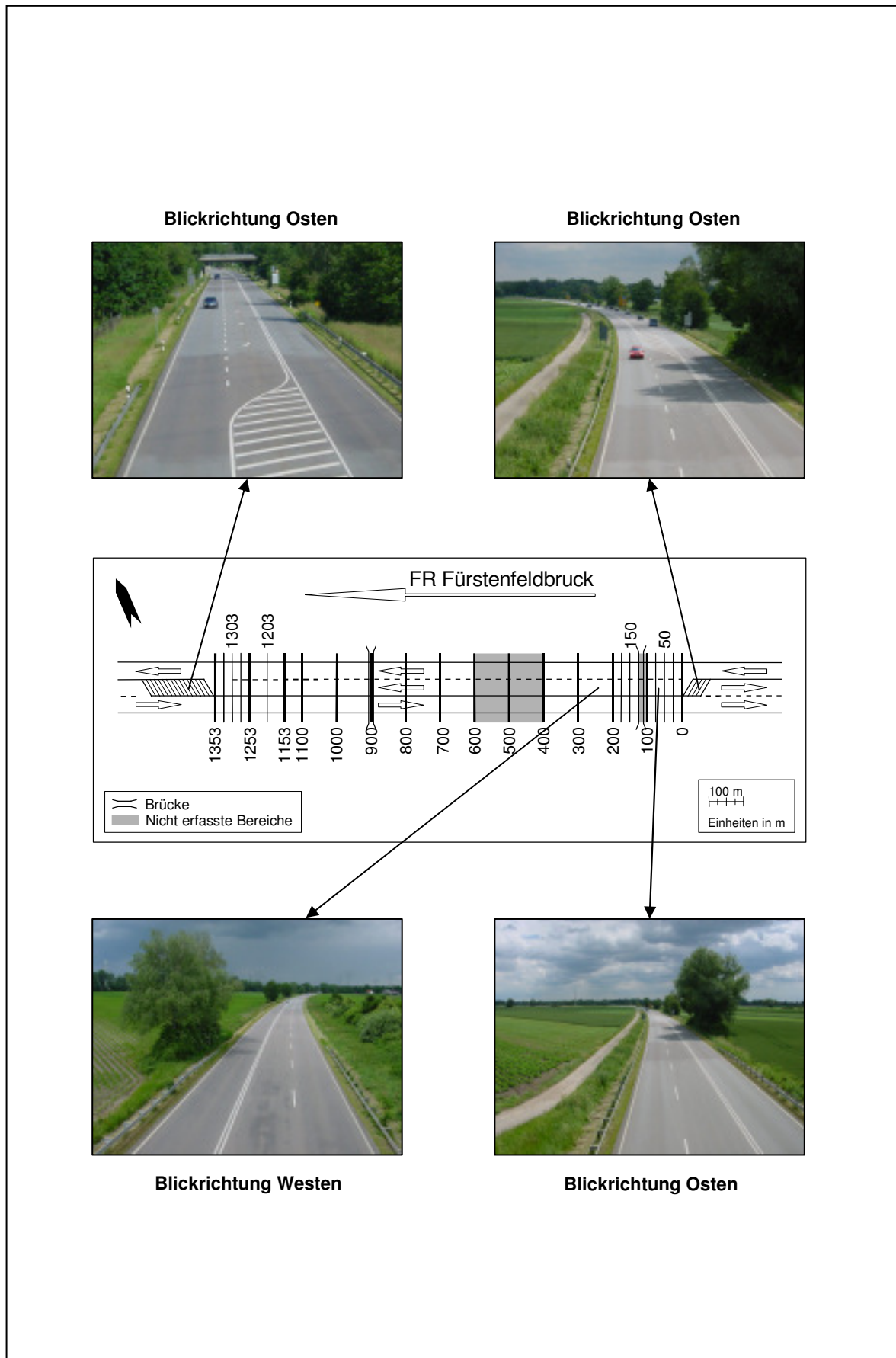


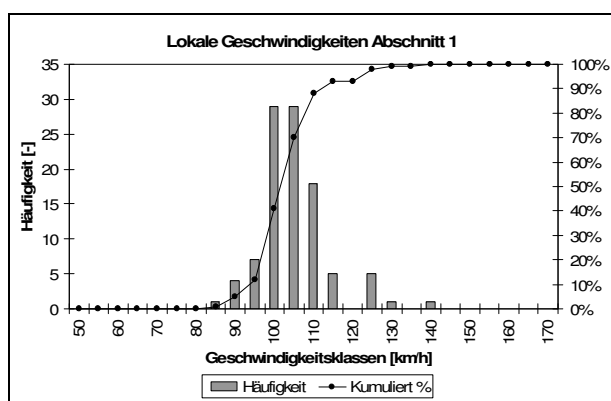
Bild A 2.27: Untersuchungsabschnitt 15

A 3 Lokale Geschwindigkeiten

A 3.1 Häufigkeitsverteilungen

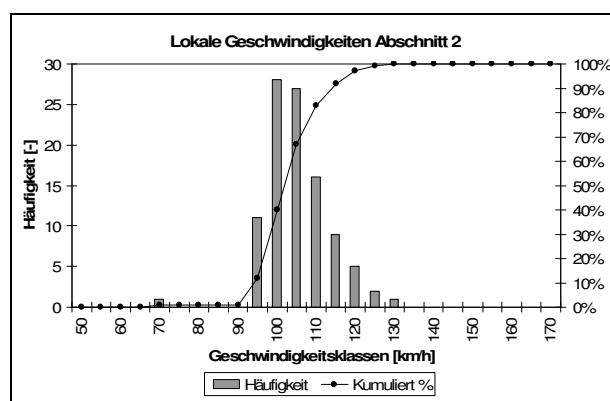
Die Daten werden gemäß DIN 55302, Blatt 1, in Klassen eingeteilt. Somit ergibt sich bei einer Anzahl von 100 Beobachtungswerten je Untersuchungsabschnitt und Vorlaufstrecke eine Klassenanzahl von $k \leq 10$. Die Spannweite zwischen maximaler und minimaler Geschwindigkeit beträgt in einem Ausnahmefall 46 km/h. Da sie in den übrigen Fällen stets über 50 km/h liegt, wurde eine praxisorientierte Klassenbreite von 5 km/h festgelegt. Der in den Histogrammen angegebene Wert der jeweiligen Geschwindigkeitsklasse beschreibt dabei den jeweils höchsten Wert einer jeden Klasse und stellt somit die obere Klassengrenze dar. Die minimale gemessene Geschwindigkeit aller erhobenen Geschwindigkeiten frei fahrender Fahrzeuge betrug 52 km/h auf der Vorlaufstrecke zu Untersuchungsabschnitt 13. Das Maximum von 169 km/h wurde auf den Überholfahrstreifen der beiden Untersuchungsabschnitte 4 und 14 registriert. Daher wird in den nachfolgenden Histogrammen der Geschwindigkeitsbereich zwischen 50 und 170 km/h dargestellt.

Abschnitt 1 (nicht normalverteilt!):



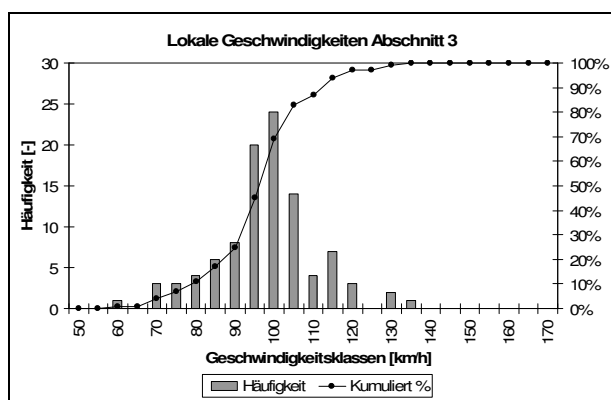
Minimum: 83 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 103,0 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 110,0 km/h
 Maximum: 138 km/h
 Standardabweichung: 8,4 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $101,3 \leq V_m \leq 104,7$ km/h

Abschnitt 2:



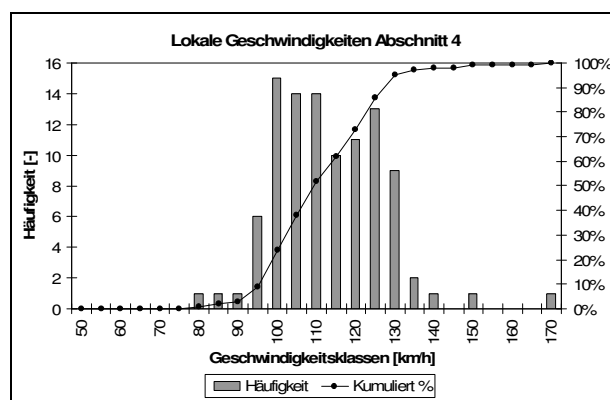
Minimum: 67 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 102,9 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 112,0 km/h
 Maximum: 130 km/h
 Standardabweichung: 8,2 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $101,3 \leq V_m \leq 104,5$ km/h

Abschnitt 3:

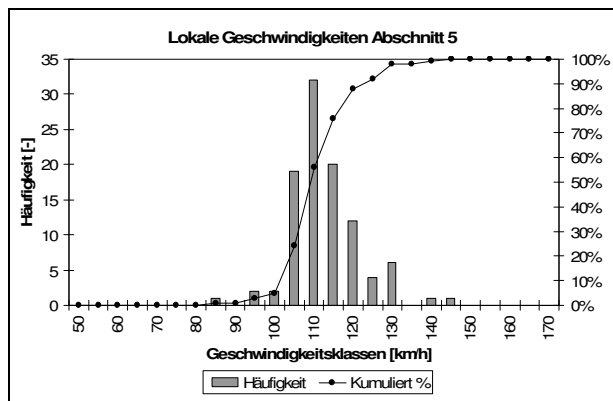


Minimum: 60 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 96,4 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 110,0 km/h
 Maximum: 135 km/h
 Standardabweichung: 13,0 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $93,9 \leq V_m \leq 98,9$ km/h

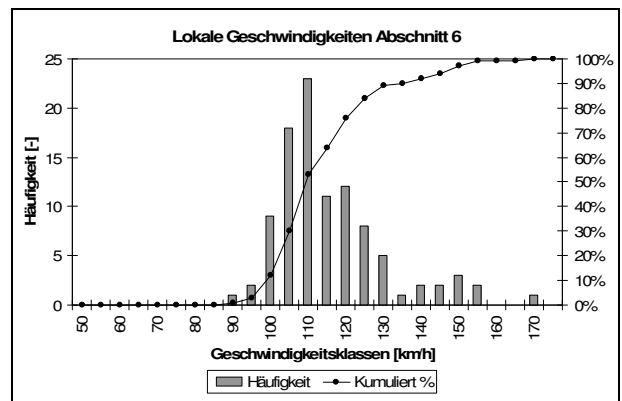
Abschnitt 4:



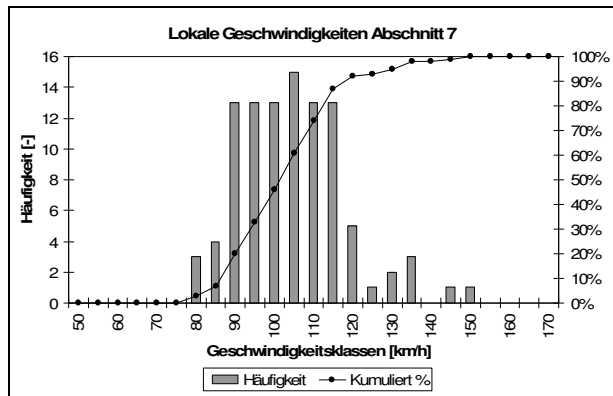
Minimum: 79 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 111,6 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 125,0 km/h
 Maximum: 169 km/h
 Standardabweichung: 13,8 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $108,9 \leq V_m \leq 114,3$ km/h

Abschnitt 5 (nicht normalverteilt!):

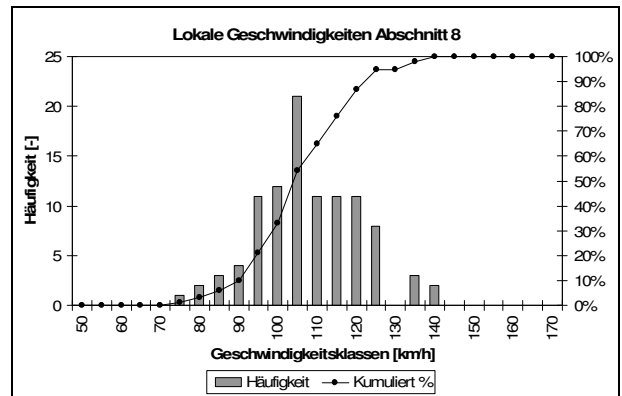
Minimum: 85 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 111,2 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 118,3 km/h
 Maximum: 145 km/h
 Standardabweichung: 9,0 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $109,4 \leq V_m \leq 113,0$ km/h

Abschnitt 6 (nicht normalverteilt!):

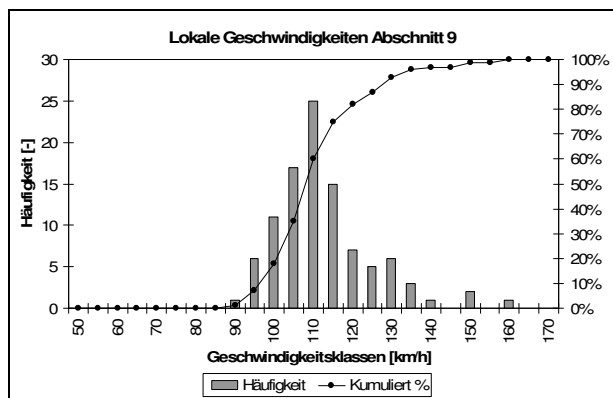
Minimum: 90 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 114,0 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 126,3 km/h
 Maximum: 166 km/h
 Standardabweichung: 14,4 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $111,2 \leq V_m \leq 116,8$ km/h

Abschnitt 7:

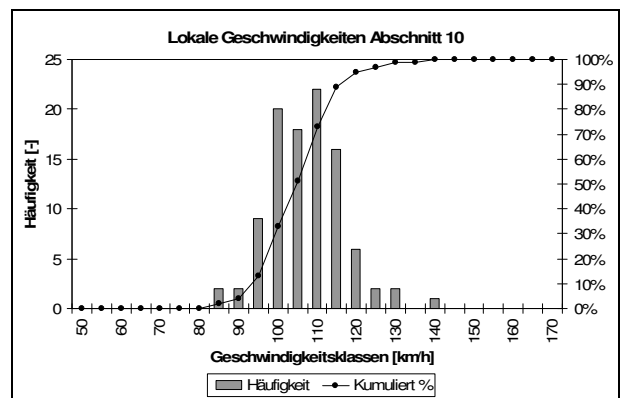
Minimum: 76 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 102,6 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 113,0 km/h
 Maximum: 147 km/h
 Standardabweichung: 13,5 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $99,9 \leq V_m \leq 105,3$ km/h

Abschnitt 8:

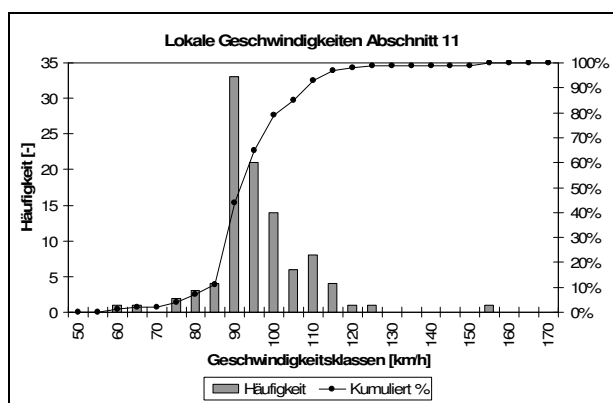
Minimum: 74 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 105,7 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 119,2 km/h
 Maximum: 136 km/h
 Standardabweichung: 12,7 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $103,2 \leq V_m \leq 108,2$ km/h

Abschnitt 9:

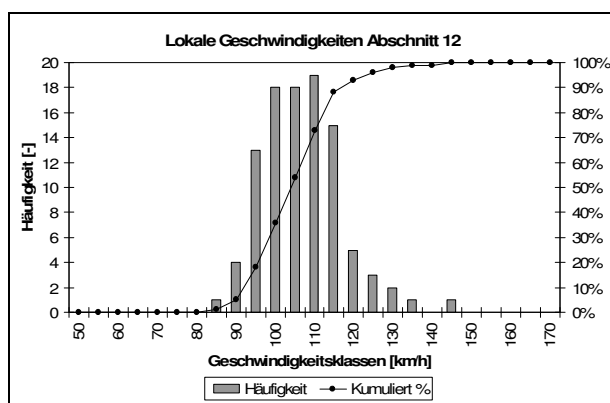
Minimum: 86 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 110,6 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 123,0 km/h
 Maximum: 157 km/h
 Standardabweichung: 12,4 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $108,2 \leq V_m \leq 113,0$ km/h

Abschnitt 10:

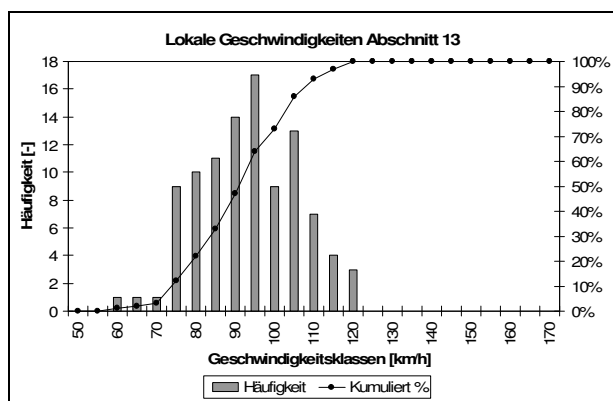
Minimum: 85 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 105,4 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 115,0 km/h
 Maximum: 137 km/h
 Standardabweichung: 9,4 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $103,6 \leq V_m \leq 107,2$ km/h

Abschnitt 11 (nicht normalverteilt!):

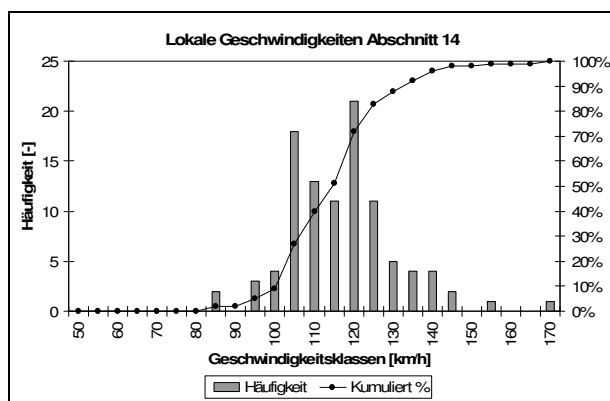
Minimum: 57 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 94,0 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 103,5 km/h
 Maximum: 154 km/h
 Standardabweichung: 12,1 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $91,6 \leq V_m \leq 96,4$ km/h

Abschnitt 12:

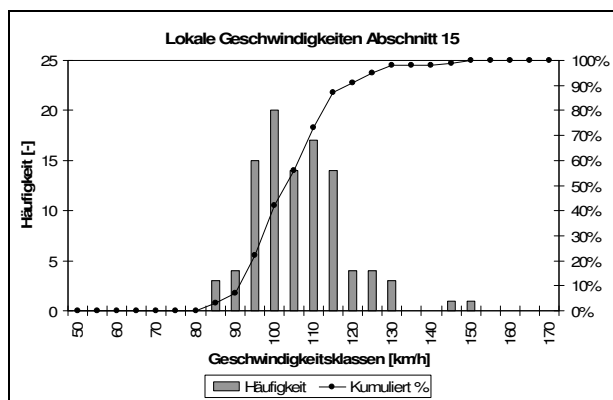
Minimum: 85 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 104,9 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 114,0 km/h
 Maximum: 142 km/h
 Standardabweichung: 10,2 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $102,9 \leq V_m \leq 106,9$ km/h

Abschnitt 13:

Minimum: 56 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 91,1 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 105,0 km/h
 Maximum: 119 km/h
 Standardabweichung: 12,6 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $88,6 \leq V_m \leq 93,6$ km/h

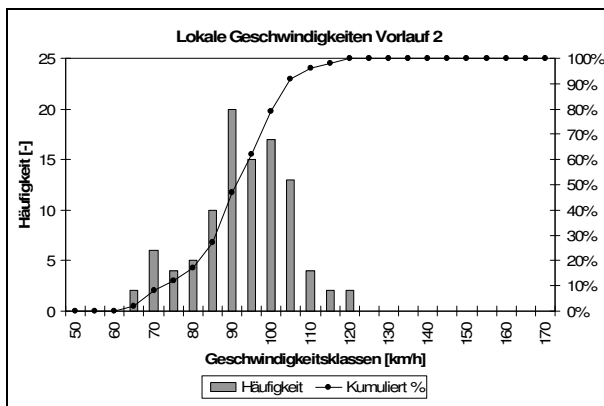
Abschnitt 14:

Minimum: 81 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 115,0 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 127,3 km/h
 Maximum: 169 km/h
 Standardabweichung: 13,9 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $112,3 \leq V_m \leq 117,7$ km/h

Abschnitt 15:

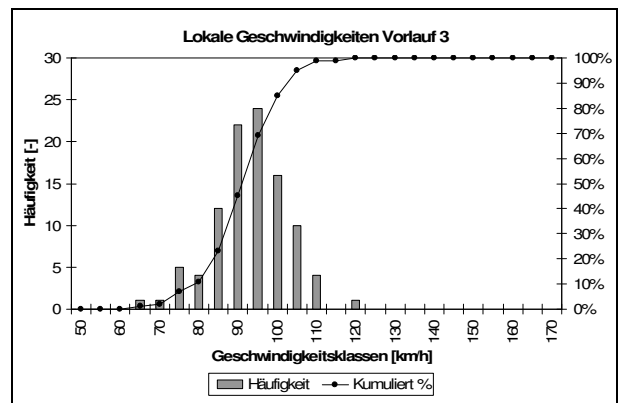
Minimum: 82 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 104,3 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 114,0 km/h
 Maximum: 149 km/h
 Standardabweichung: 11,5 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $102,0 \leq V_m \leq 106,6$ km/h

Vorlauf 2:



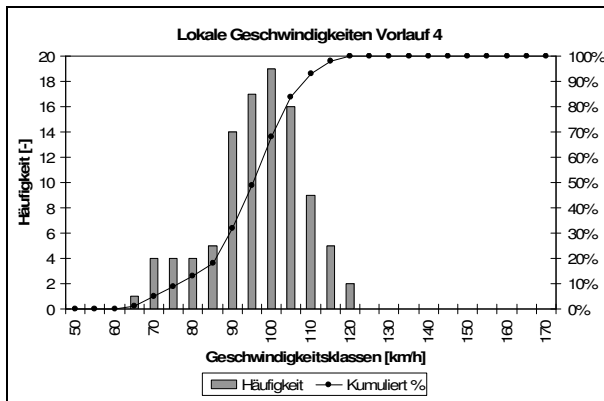
Minimum: 62 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 91,1 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 103,0 km/h
 Maximum: 119 km/h
 Standardabweichung: 11,8 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $88,8 \leq V_m \leq 93,4$ km/h

Vorlauf 3:



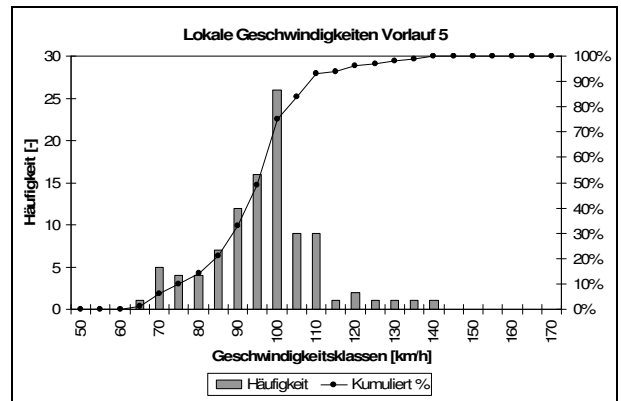
Minimum: 65 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 91,0 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 100,2 km/h
 Maximum: 116 km/h
 Standardabweichung: 9,2 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $89,2 \leq V_m \leq 92,8$ km/h

Vorlauf 4:



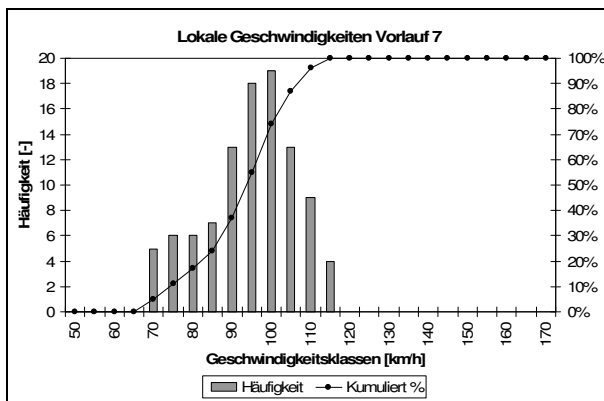
Minimum: 64 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 94,2 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 106,0 km/h
 Maximum: 120 km/h
 Standardabweichung: 11,8 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $91,9 \leq V_m \leq 96,5$ km/h

Vorlauf 5 (nicht normalverteilt!):



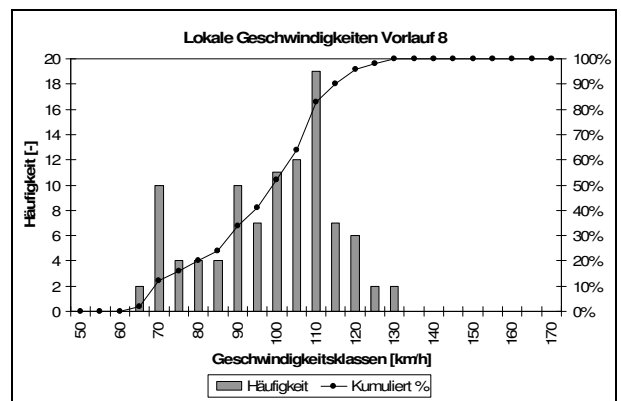
Minimum: 62 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 94,4 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 106,2 km/h
 Maximum: 139 km/h
 Standardabweichung: 13,6 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $91,7 \leq V_m \leq 97,1$ km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $90,7 \leq V_m \leq 95,3$ km/h

Vorlauf 7:



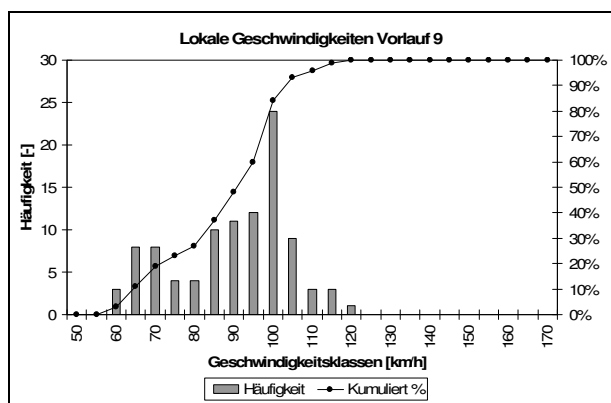
Minimum: 68 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 93,0 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 104,2 km/h
 Maximum: 114 km/h
 Standardabweichung: 11,5 km/h

Vorlauf 8 (nicht normalverteilt!):



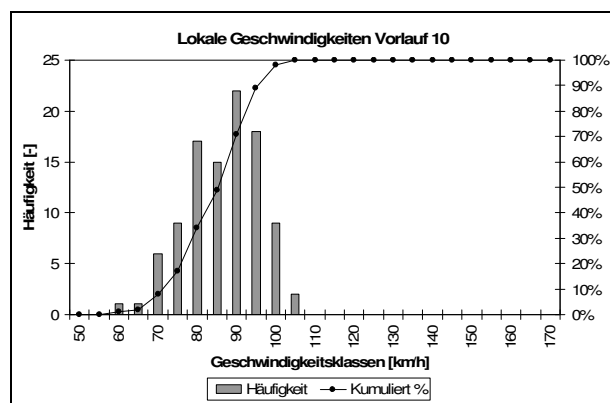
Minimum: 61 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 96,4 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 112,0 km/h
 Maximum: 129 km/h
 Standardabweichung: 16,5 km/h

Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $93,2 \leq V_m \leq 99,6$ km/h
Vorlauf 9 (nicht normalverteilt!):



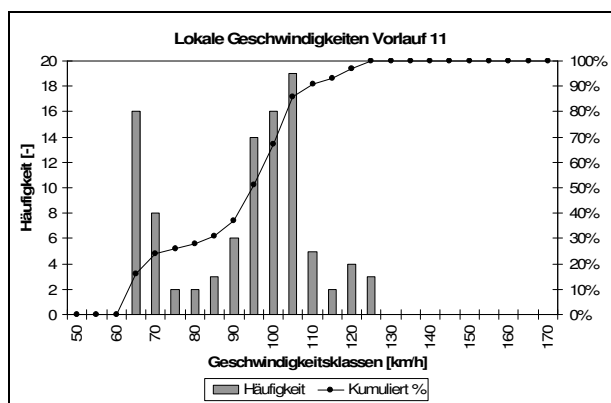
Minimum: 57 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 88,0 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 101,2 km/h
 Maximum: 116 km/h
 Standardabweichung: 14,5 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $85,1 \leq V_m \leq 90,8$ km/h

Vorlauf 10:



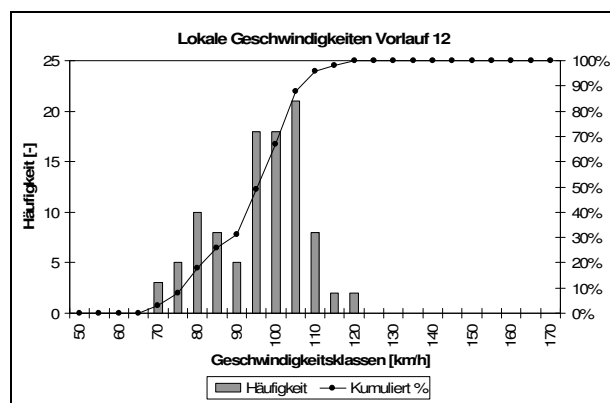
Minimum: 57 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 84,5 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 94,0 km/h
 Maximum: 103 km/h
 Standardabweichung: 9,1 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $82,7 \leq V_m \leq 86,3$ km/h

Vorlauf 11 (nicht normalverteilt!):



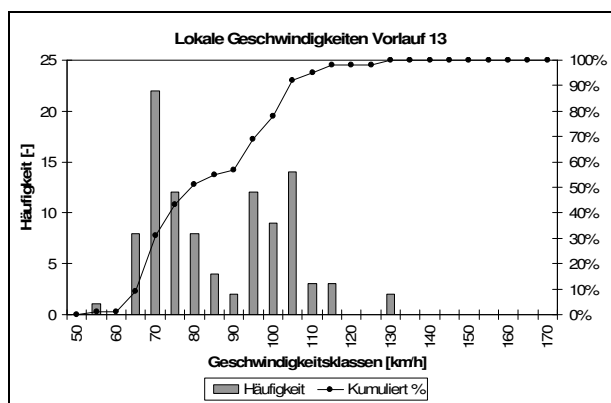
Minimum: 62 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 90,6 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 104,2 km/h
 Maximum: 125 km/h
 Standardabweichung: 17,3 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $87,2 \leq V_m \leq 94,0$ km/h

Vorlauf 12 (nicht normalverteilt!):



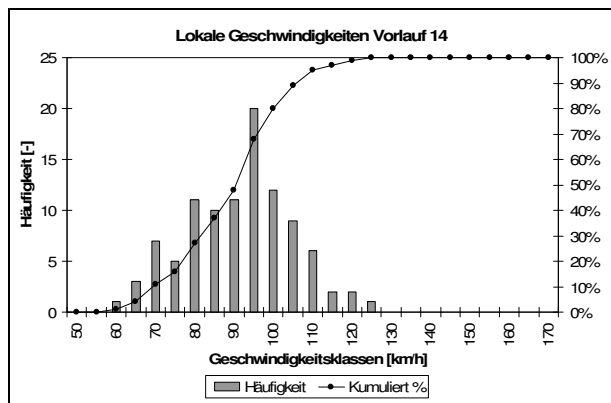
Minimum: 66 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 93,8 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 104,0 km/h
 Maximum: 118 km/h
 Standardabweichung: 11,3 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $91,6 \leq V_m \leq 96,0$ km/h
 Standardabweichung: 16,7 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $80,8 \leq V_m \leq 87,3$ km/h

Vorlauf 13 (nicht normalverteilt!):



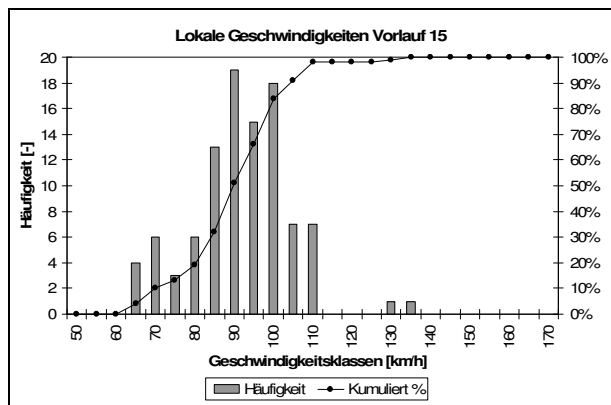
Minimum: 52 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 84,1 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 103,0 km/h
 Maximum: 128 km/h

Vorlauf 14:



Minimum: 60 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 89,3 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 104,0 km/h
 Maximum: 125 km/h
 Standardabweichung: 13,5 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $86,6 \leq V_m \leq 92,0$ km/h

Vorlauf 15:



Minimum: 61 km/h
 Arithmetischer Mittelwert V_m : 90,2 km/h
 0,85-Quantil V_{85} : 101,0 km/h
 Maximum: 132 km/h
 Standardabweichung: 12,7 km/h
 Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$): $87,7 \leq V_m \leq 92,7$ km/h

A 3.2 Test auf Normalverteilung (X²-Test)

Es ist zu prüfen, ob sich die Verteilung der erhobenen Geschwindigkeiten signifikant von einer theoretischen Verteilung unterscheiden. Für diesen Signifikanztest ist die X²-Verteilung die geeignete Prüfverteilung.

Die Anwendung des Tests erfolgt in den folgenden Schritten:

1. Die Daten werden, wie bereits im Abschnitt A 3.1 beschrieben, in Klassen eingeteilt.
2. Für die Klassengrenzen X_{gj} wird die standardisierte Variable η_{gj} berechnet.

$$\eta_{gj} = \frac{X_{gj} - \bar{x}}{\hat{s}_x}$$

3. Für die Variable η_{gj} wird die zugehörige Unterschreitungswahrscheinlichkeit $F_\eta(\eta)$ aus den entsprechenden Tabellen ermittelt. Durch Multiplikation von $F_\eta(\eta)$ mit der Anzahl n wird die theoretische Summenhäufigkeit f_i bestimmt. Durch Differenzbildung wird die theoretische Häufigkeit f_j in der j -ten Klasse berechnet.
4. In jeder Klasse wird nun die Differenz $f_j - n_j$ gebildet und hiermit die Größe $\Delta\chi_j^2$ ermittelt:

$$\Delta\chi_j^2 = \frac{(f_j - n_j)^2}{f_j}$$

Die Summe dieser Größen über alle Klassen ergibt die Größe χ^2 :

$$\chi^2 = \sum \Delta\chi_j^2$$

5. Anschließend wird der Freiheitsgrad m berechnet:

$$m = j_{\max} - 1 - r$$

Dabei ist j_{\max} die Anzahl der Klassen und r die Anzahl der geschätzten Parameter.

6. Bevor nun der eigentliche statistische Hypothesentest durchgeführt werden kann, ist eine „logische“ Nullhypothese zu formulieren, bei deren Überprüfung das Risiko für den „schwerwiegendsten“ Fehler¹ zu minimieren ist.

Wie etliche Untersuchungen zum Geschwindigkeitsverhalten auf Straßen bereits gezeigt haben, ist i.d.R. davon auszugehen, dass die gefahrenen Geschwindigkeiten eines Fahrzeugkollektivs einer Normalverteilung folgen (vgl. Ziffer 6.6.1).

Die Nullhypothese H_0 lautet dementsprechend: Die Geschwindigkeiten sind normalverteilt bzw. es gibt keinen Unterschied zwischen der empirischen Verteilung mit den Parametern V_m und s und der Normalverteilung mit den Parameter μ und σ .

Die Alternativhypothese H_1 lautet somit: Die Geschwindigkeiten sind nicht normalverteilt bzw. die Verteilungen unterscheiden sich.

7. Festlegung des Signifikanzniveaus unter Berücksichtigung des β -Fehlers (vgl. Ziffer 6.6)

¹ Anmerkung: Anders als bei Hypothesentests, die z.B. die Wirksamkeit von Maßnahmen überprüfen, die sich auf die Verkehrssicherheit auswirken können, liegt bei dem Test der empirisch erhobenen Geschwindigkeiten auf Normalverteilung vom Prinzip her kein „schwerwiegendster“ Fehler vor, sollte man sich mit dem Ergebnis des Tests irren.

Beim χ^2 -Test auf Normalverteilung einer empirisch gewonnenen Geschwindigkeitsverteilung, soll im Rahmen dieser Untersuchung einerseits mit einer (relativ) hohen Sicherheit gewährleistet werden, dass falls eine Normalverteilung vorliegt, diese auch erkannt wird (geringes α -Risiko). Andererseits soll aber auch für den Fall, dass keine Normalverteilung vorliegt, dieses ebenfalls mit einer hohen Sicherheit erkannt werden (geringes β -Risiko).

Die Problematik dieser Forderung liegt in dem Zielkonflikt, dass beide Fehlerarten von einander abhängen. D.h., je kleiner die Irrtumswahrscheinlichkeit α gewählt wird, desto geringer ist das (α -) Risiko, die Nullhypothese abzulehnen, obwohl sie wahr ist (Fehler 1. Art). Dies verursacht jedoch u.U. ein relativ hohes β -Risiko (Fehler 2. Art), die Nullhypothese fälschlicherweise anzunehmen. Hinzukommt, dass man das β -Risiko im Gegensatz zum α -Risiko leider nicht so einfach quantifizieren kann.

Aufgrund der vorangegangenen Überlegungen zum Aufstellen der Nullhypothese (Geschwindigkeiten sind i.d.R. normalverteilt!), wird für den Test auf Normalverteilung der erhobenen Geschwindigkeiten festgelegt, dass das β -Risiko gegenüber dem α -Risiko vernachlässigt werden kann. Das Signifikanzniveau für den durchzuführenden χ^2 -Test wird daher zu $\alpha = 95\%$ gewählt. Die Konsequenz daraus ist, dass das Risiko, die Nullhypothese fälschlicherweise abzulehnen (, obwohl sie wahr ist) bei lediglich 5 % liegt. Andererseits entsteht dadurch aber ein relativ hohes (jedoch bewusst in Kauf genommenes und nicht zu quantifizierendes) Risiko, dass die Nullhypothese fälschlicherweise angenommen wird.

8. Durchführung des statistischen Hypothesentests:

Aus der Tabelle der χ^2 -Verteilung wird unter Berücksichtigung des Signifikanzniveaus α und des Freiheitsgrads m die Testgröße χ_{test}^2 ermittelt. Falls $\chi^2 < \chi_{\text{test}}^2$ gilt, ist die Nullhypothese H_0 anzunehmen bzw. nicht zu verwerfen. Die Höhe des β -Risikos, die Nullhypothese anzunehmen, obwohl sie „falsch“ ist, lässt sich nicht quantifizieren. Gilt $\chi^2 > \chi_{\text{test}}^2$, ist die Nullhypothese H_0 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von (hier:) 5 % zu verwerfen. Es erfolgt die Annahme der Alternativhypothese H_1 . D.h., dass das Risiko „Die gemessenen Geschwindigkeiten sind tatsächlich doch normalverteilt!“ dann bei lediglich 5 % liegt.

A 3.3 KOLMOGOROFF-SMIRNOFF-Anpassungstest

A 3.3.1 Allgemeines

Im Folgenden soll geprüft werden, ob sich zwei empirische Verteilungen signifikant voneinander unterscheiden oder ob sie aus einer Grundgesamtheit stammen. Der geeignete Test für diese Fragestellung ist der KOLMOGOROFF-SMIRNOFF-Anpassungstest (KS-Test). Dabei handelt es sich um einen nicht-parametrischen Test, d.h. die empirischen (kumulierten) Verteilungsfunktionen müssten theoretisch nicht bekannt sein. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden aufgrund der unter den Ziffern 6.6.4 und 8.1 beschriebenen Zielsetzung des KS-Tests nur die anhand des χ^2 -Test als normalverteilt identifizierten Geschwindigkeitsverteilungen gegeneinander getestet. Die Prüfgröße ist dabei die maximale Differenz:

$$D_{\max} = \max \{F_1(x) - F_2(x)\}$$

D_{\max} wird anschließend dem kritischen Wert D_{krit} gegenübergestellt, der sich in Abhängigkeit von den jeweiligen Stichprobenumfängen sowie dem gewählten Signifikanzniveau ergibt. Die Quantile D_{krit} sind aus Tabellenwerken zu entnehmen. Für den KS-Test sind auch die unter Ziffer A 3.2, Nr. 6 und Nr. 7 aufgeführten Überlegungen zum χ^2 -Test sinngemäß anzuwenden.

Die Nullhypothese H_0 beim KS-Test lautet: Die verglichenen Geschwindigkeitsverteilungen stammen aus der gleichen, mit den Parametern (μ , σ) normalverteilten Grundgesamtheit. Die anhand der Stichproben festgestellten Unterschiede sind zufällig.

Die Alternativhypothese H_1 lautet dementsprechend: Die anhand der Stichproben festgestellten Unterschiede existieren mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auch in der Grundgesamtheit

Die Nullhypothese ist zu verwerfen bei: $D_{\max} > D_{\text{krit}}$

Der „schwerwiegendste“ Fehler wäre beim vorliegenden KS-Test der, dass die verglichenen Messreihen als unabhängig voneinander identifiziert werden, sie es aber tatsächlich nicht sind. D.h., dass die Nullhypothese verworfen wird, obwohl sie eigentlich zutrifft (Fehler 1. Art). Diesen Fehler gilt es möglichst zu vermeiden, um die Unabhängigkeit der Stichproben zu gewährleisten. Die Forderung nach der Minimierung des Risikos für den Fehler 1. Art bedeutet ein möglichst geringes α -Risiko. Dadurch wird aber in Analogie zu den Ausführungen zum χ^2 -Test (vgl. Ziffer A 3.2) die Wahrscheinlichkeit für die Annahme der H_0 vergrößert, d.h. das Risiko für den Fehler 2. Art steigt. Die Stichproben werden evtl. fälschlicherweise als „gleich“ identifiziert, sind es aber in Wahrheit nicht. Die (tatsächlichen) Unterschiede und die dafür verantwortlichen Einflüsse können dann nicht mehr identifiziert werden. Eine Zusammenfassung der beiden Stichproben wäre, wenn man einen Fehler 2. Art beginge, eigentlich unzulässig.

In Abwägung dieser Überlegungen wird für den KS-Test das α -Risiko zu 1 % festgelegt. Damit soll das Risiko minimiert werden, den Sachverhalt anzunehmen, dass eine Unabhängigkeit der Stichproben vorliegt, obwohl sich die Geschwindigkeitsverteilungen tatsächlich nur zufällig unterscheiden. Das hohe β -Risiko (anzunehmen, dass eine Übereinstimmung vorliegt, obwohl sie tatsächlich nicht vorliegt) wird dabei billigend in Kauf genommen.

Das Quantil für D_{krit} ergibt sich mit $\alpha = 0,01$ und $n > 40^2$ nach HARTUNG (2002), S. 184, Tab. 14 zu 1,63.

² Diese Bedingung wird für alle verglichenen Stichproben eingehalten.

A 3.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse des KS-Tests werden im Bild A 3.1 in Form einer Matrix dargestellt. Alle Messreihen für die eine Normalverteilung nachgewiesen werden konnte, werden einander gegenüber gestellt.³ Ein mit „nein“ belegtes Feld bedeutet dabei, dass die Nullhypothese nicht verworfen werden musste, die Geschwindigkeiten der beiden betrachteten Untersuchungsabschnitte demnach aus einer Grundgesamtheit stammen. Bei der Angabe „ja“ liegen signifikante Unterschiede in den beiden betrachteten Geschwindigkeitsverteilungen vor. Die Nullhypothese wird mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % verworfen.

Um eine bessere Übersichtlichkeit zu erreichen, wurden die Abschnitte in Abhängigkeit ihrer Position farblich gekennzeichnet. Die „dunklen“ Felder kennzeichnen dabei die Überholabschnitte an Pos. 1 sowie die Vorlaufstrecken, die außerhalb der eigentlichen 2+1-Strecke liegen. Die „hell“ hinterlegten Felder repräsentieren hingegen die Überholabschnitte, die sich nicht an Pos. 1 befinden sowie die zugehörigen Vorlaufstrecken.

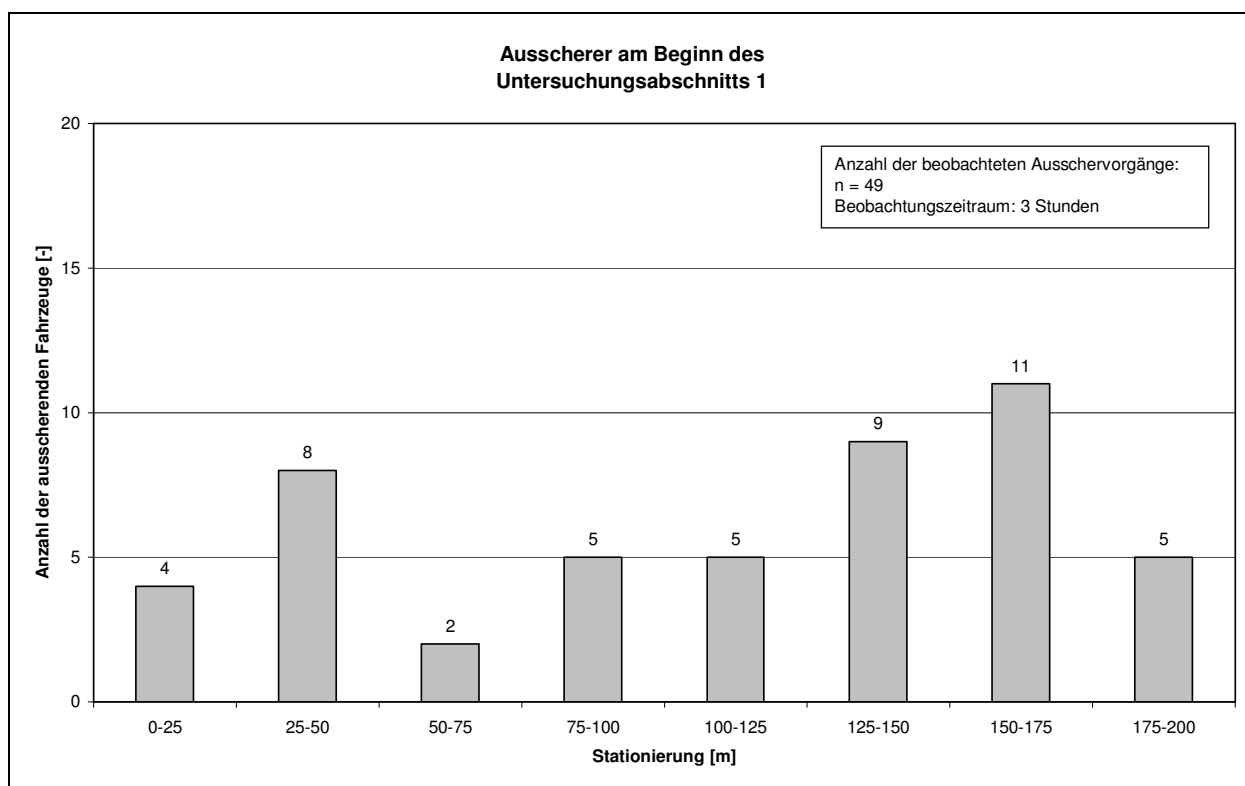
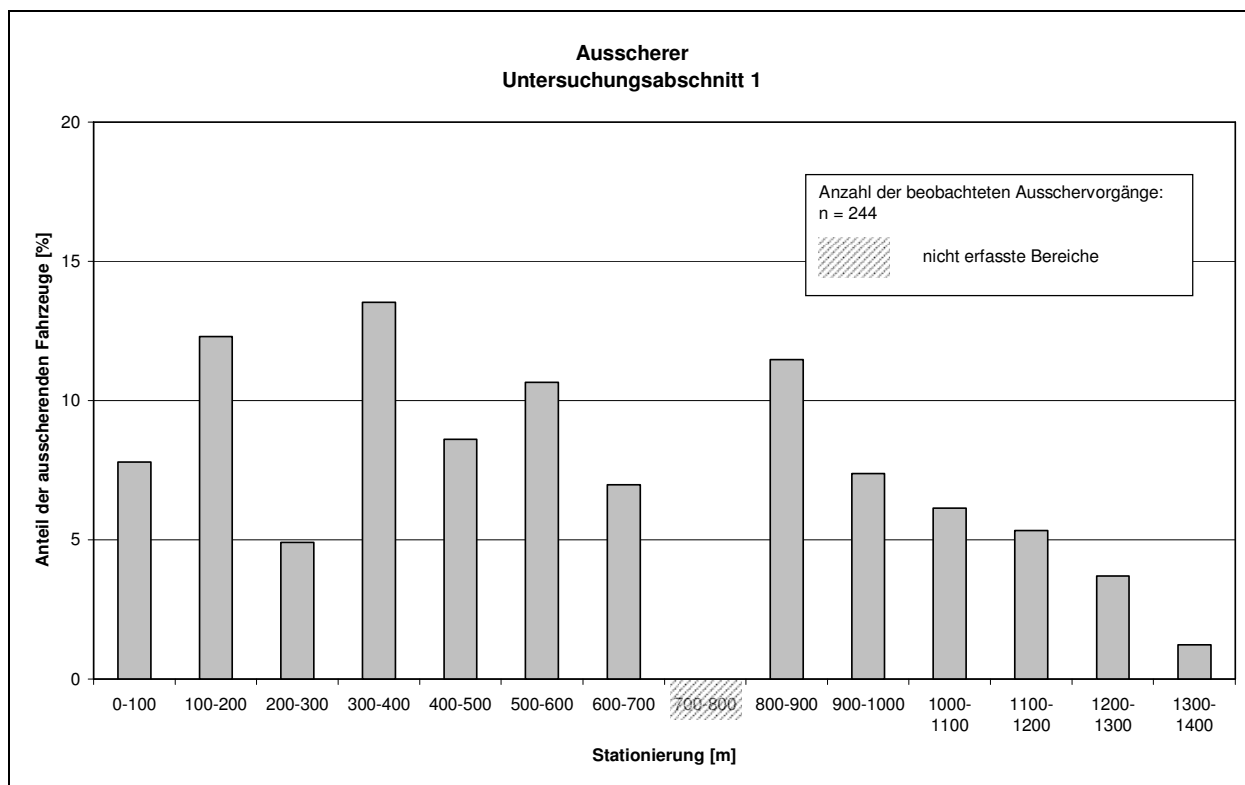
Im Quadranten links oben ist der Vergleich zwischen den (normalverteilten) Geschwindigkeiten auf den Überholfahrstreifen dargestellt. Der Quadrant rechts oben zeigt die Gegenüberstellung der (normalverteilten) Geschwindigkeiten auf dem Überholfahrstreifen und der jeweiligen zugehörigen Vorlaufstrecke. Der Quadrant rechts unten enthält schließlich die Ergebnisse des KS-Tests für den Vergleich der (normalverteilten) Geschwindigkeiten auf den Vorlaufstrecken.

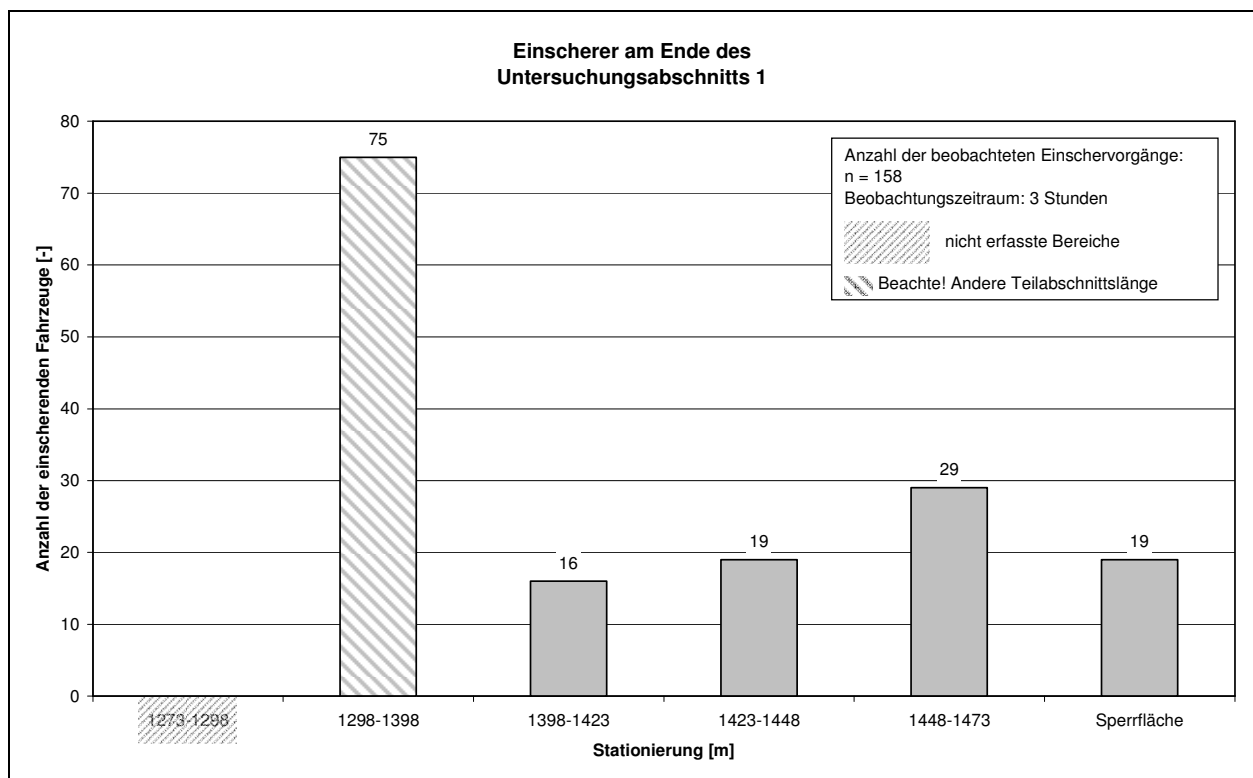
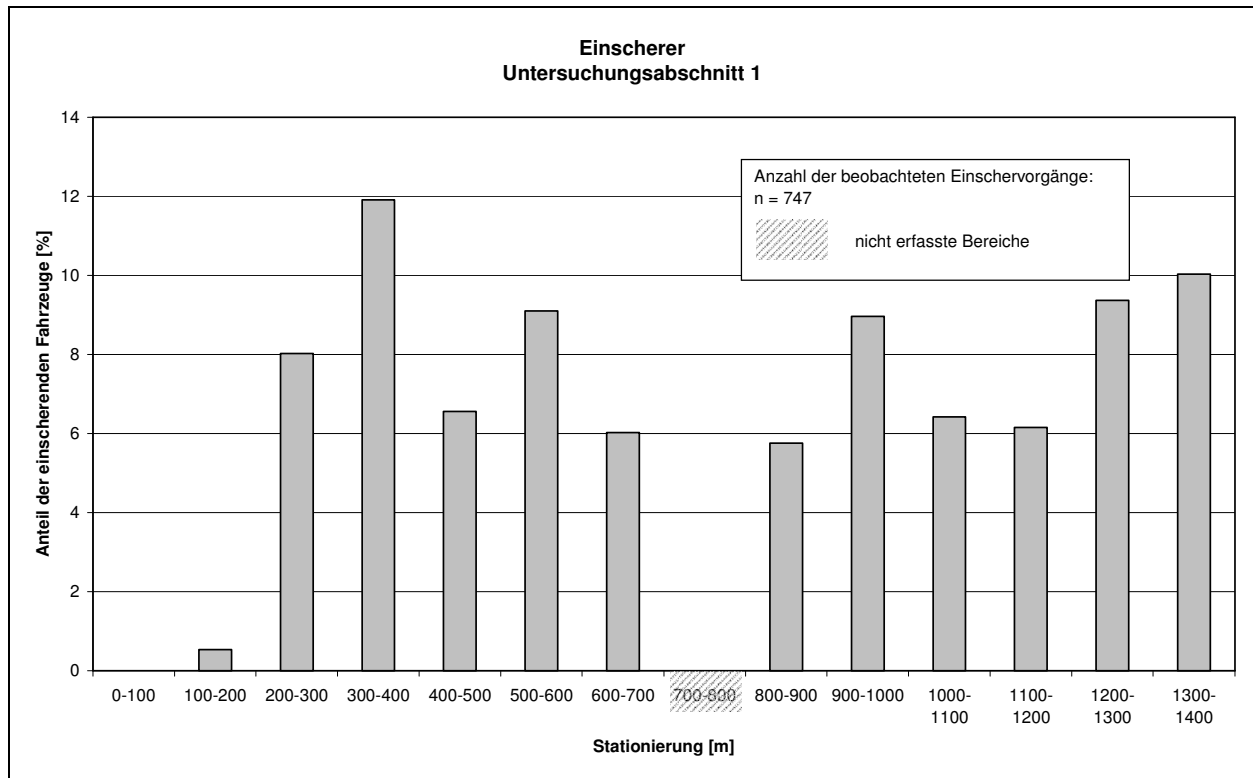
	A2	A3	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14	A15	V2	V3	V4	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V14	V15
A2	-	nein	nein	nein	ja	ja	nein	ja	ja	nein	nein	ja	nein										
A3		-	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein		nein									
A4			-	ja	nein	ja	ja	nein	nein	nein	ja	nein			nein								
A6				-	nein	ja	ja	ja	ja	nein	ja	nein											
A7					-	ja	nein	ja	ja	nein	nein	ja				nein							
A8						-	ja	ja	ja	nein	nein	ja					ja						
A9							-	ja	ja	nein	nein	nein						nein					
A10								-	ja	nein	nein	ja							nein				
A12									-	nein	nein	ja									nein		
A13										-	nein	nein											
A14											-	nein										nein	
A15												-											nein
V2													-	ja	ja	ja	nein	ja	nein	nein	nein	ja	ja
V3														-	ja	ja	nein	ja	nein	nein	nein	ja	ja
V4															-	ja	nein	ja	nein	ja	ja	ja	ja
V7																-	nein	ja	nein	ja	ja	ja	ja
V8																	-	nein	nein	ja	nein	nein	nein
V9																		-	nein	ja	ja	ja	ja
V10																			-	nein	nein	ja	ja
V11																				-	ja	nein	nein
V12																					-	nein	nein
V14																						-	ja
V15																							-

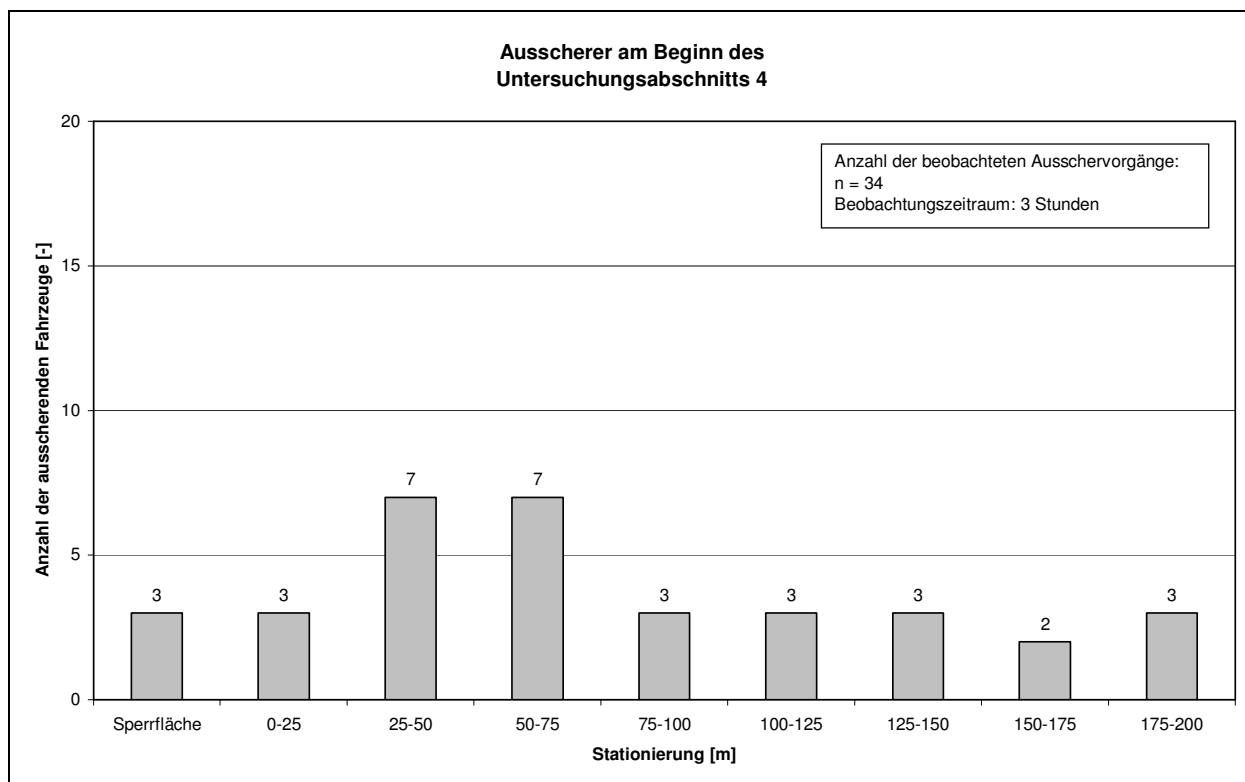
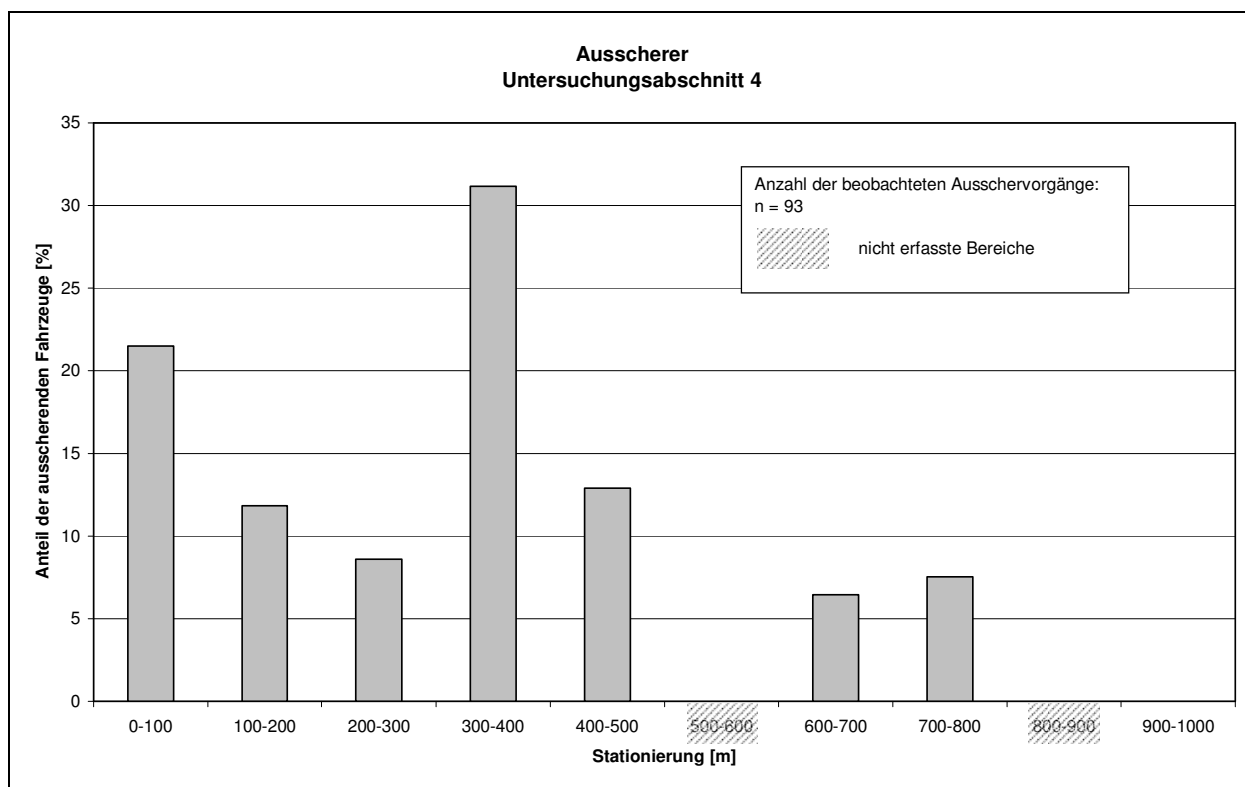
Bild A 3.1: Ergebnisse des KS-Tests

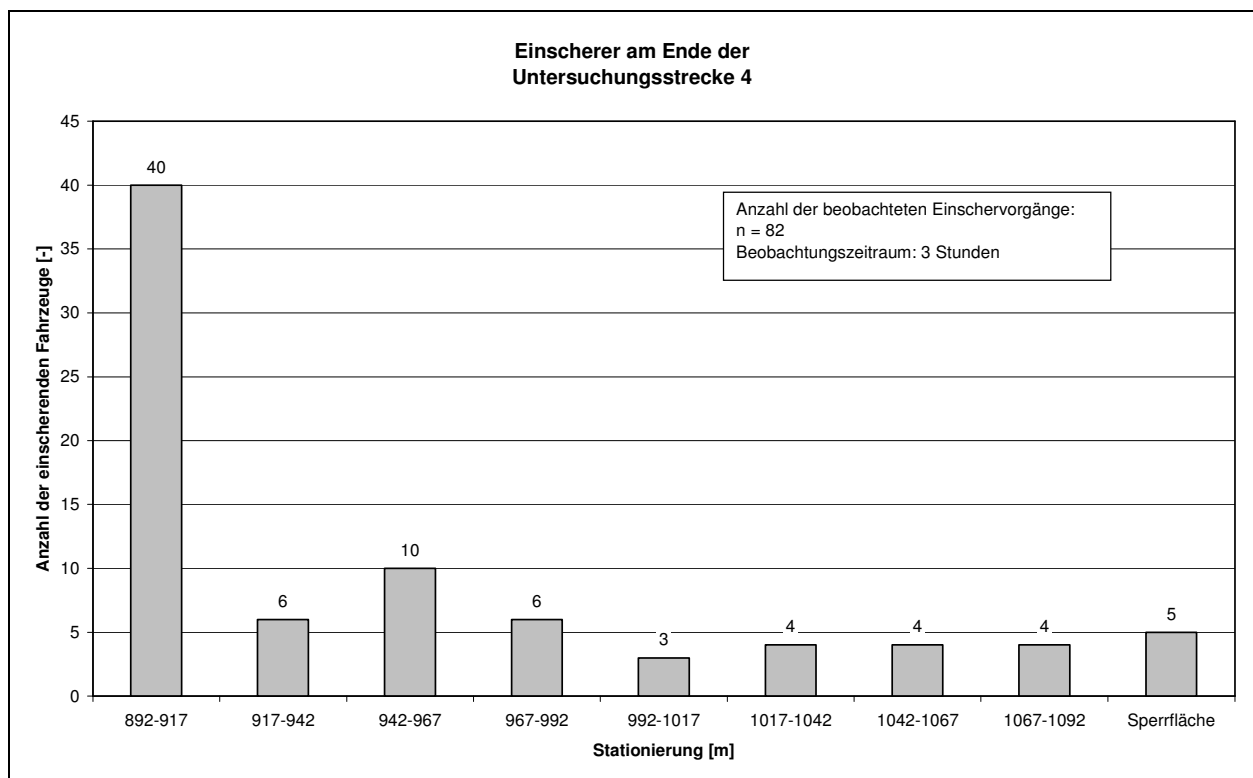
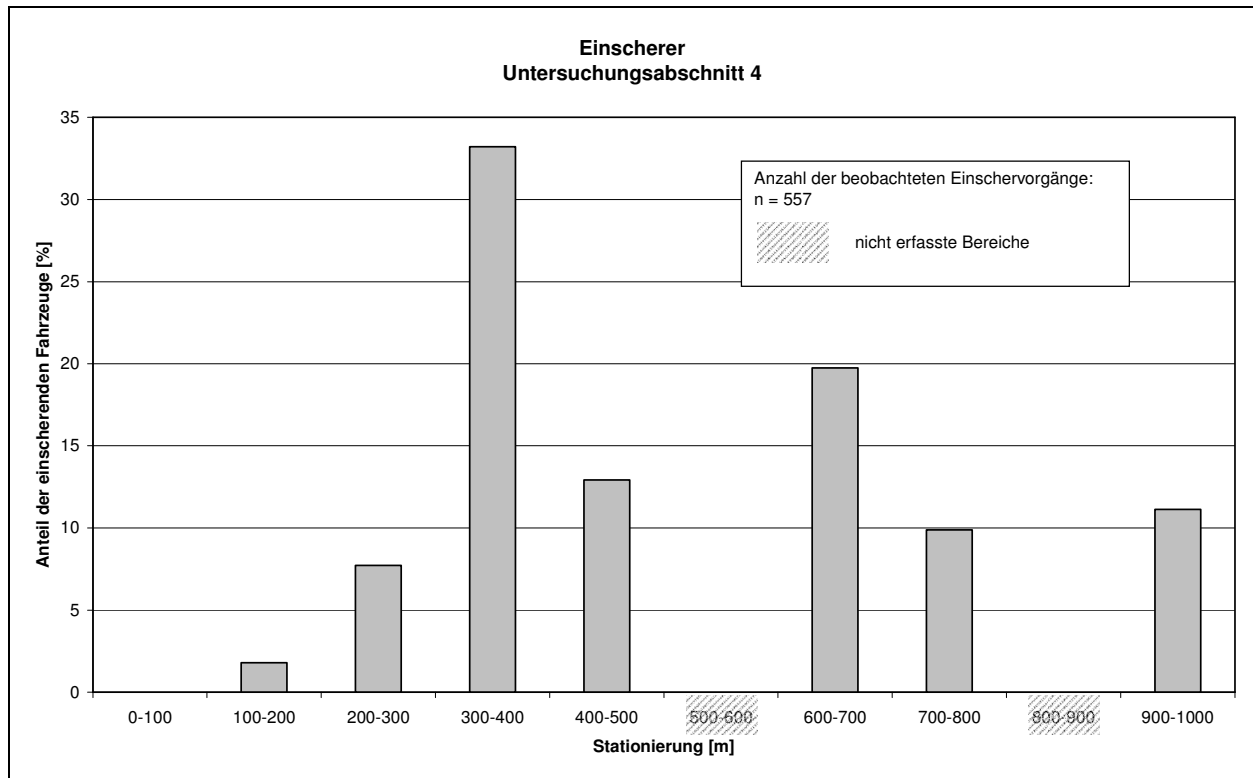
³ Da es sich beim KS-Test um einen nicht-parametrischen Test handelt, ergibt sich diese Einschränkung nicht aus der Verfahrensvorschrift zu diesem Test, sondern einzig aus der mit diesem Test verfolgten Zielsetzung (vgl. Ziffer 6.6.4).

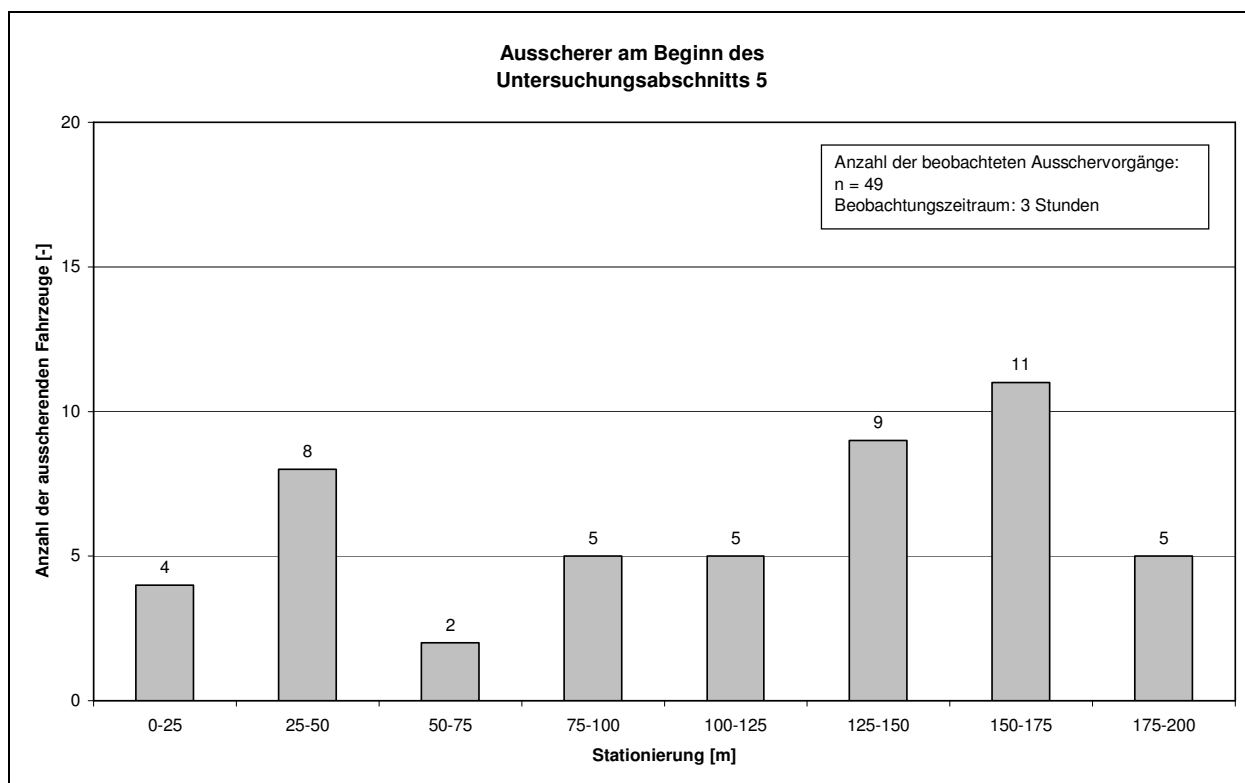
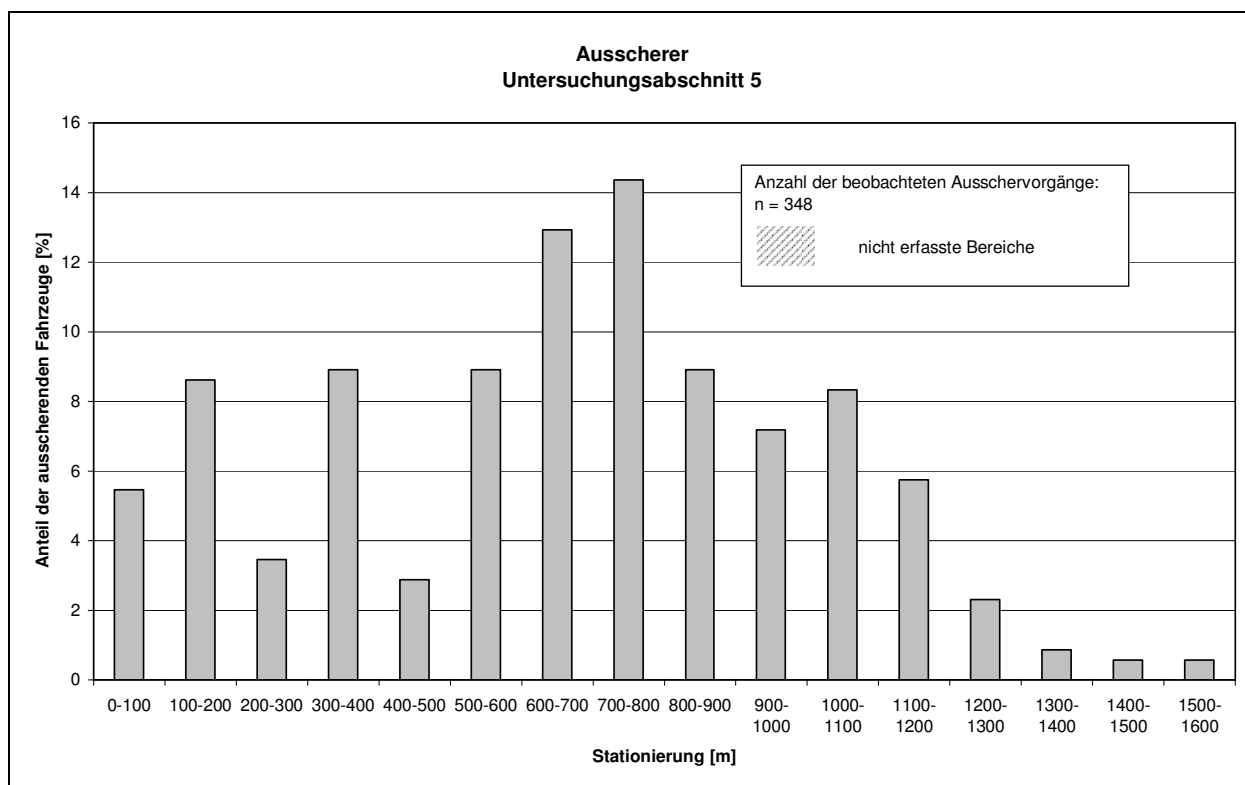
A 4 Aus- und Einschervorgänge

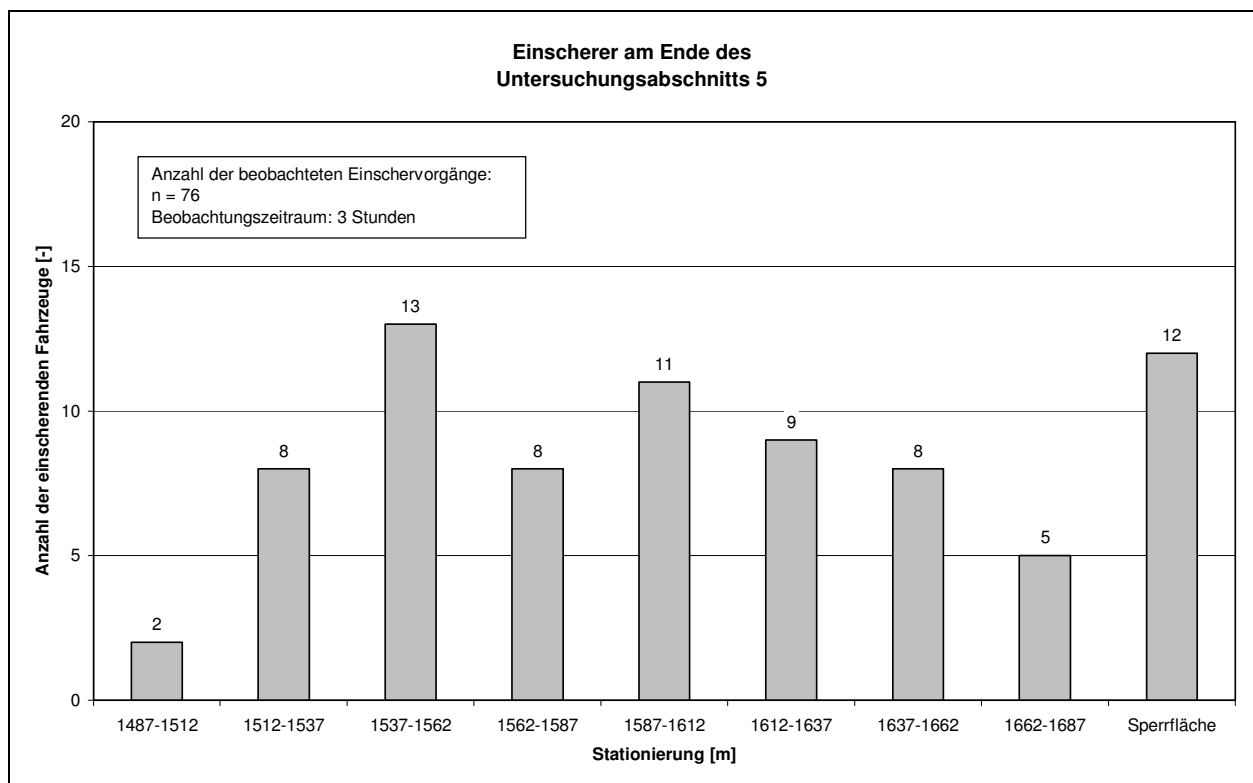
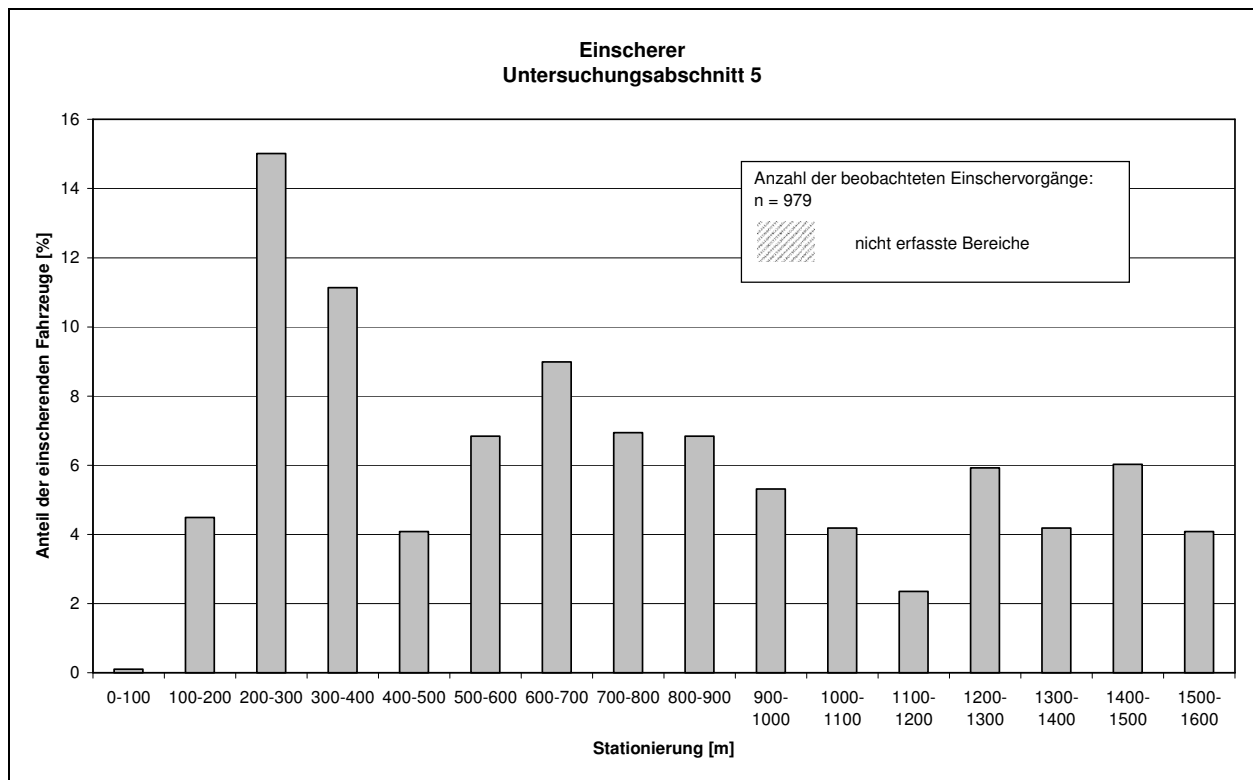


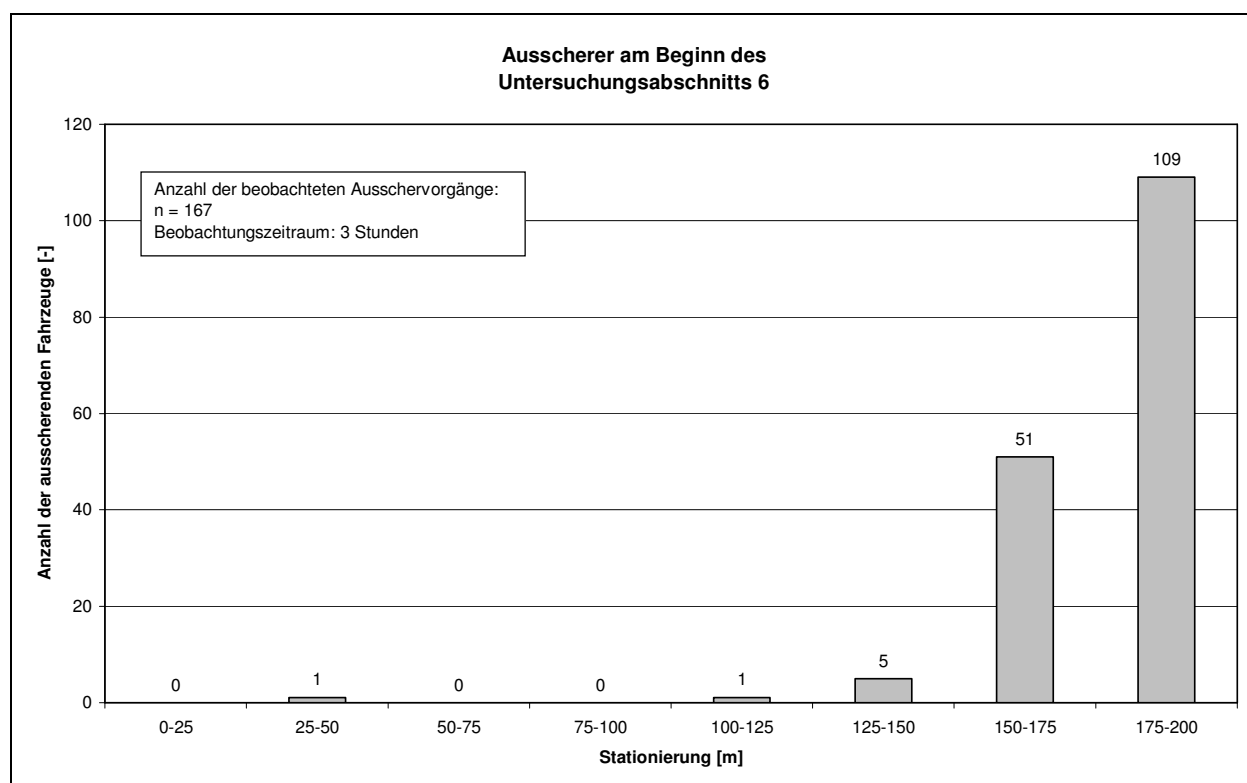
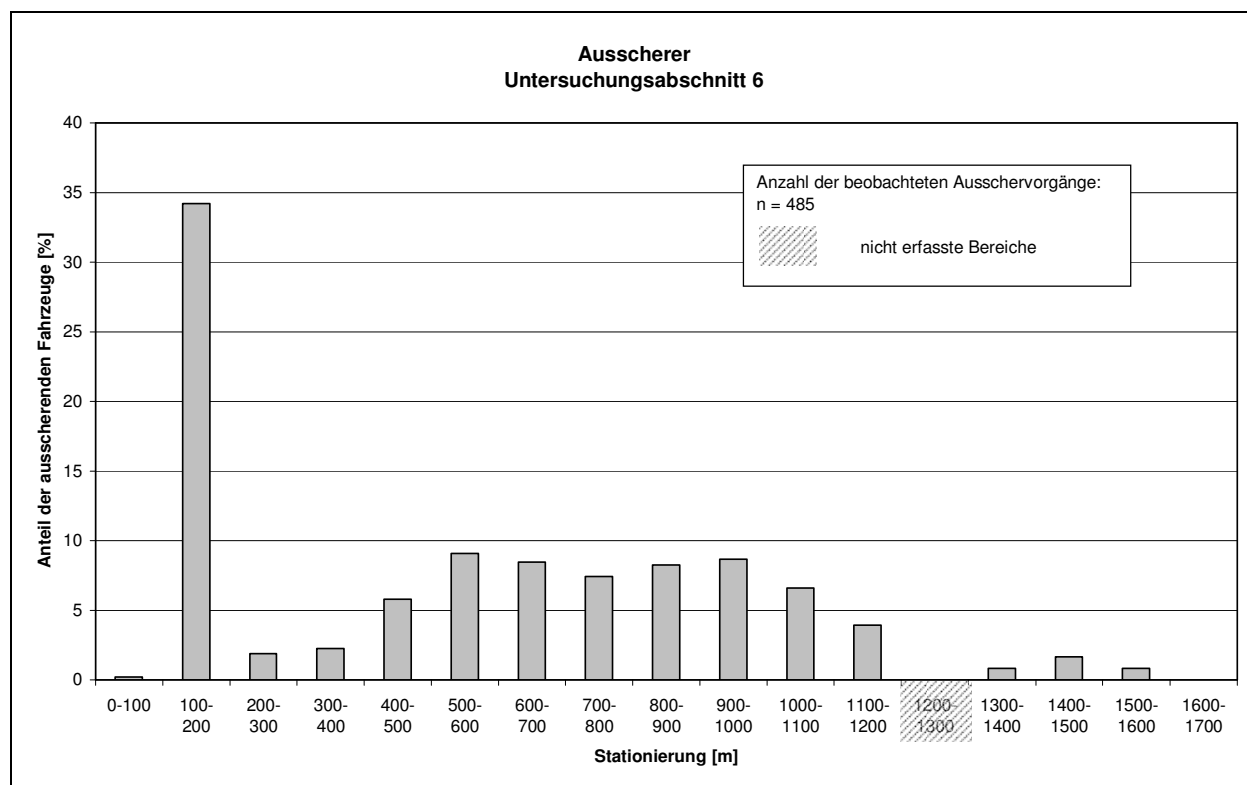


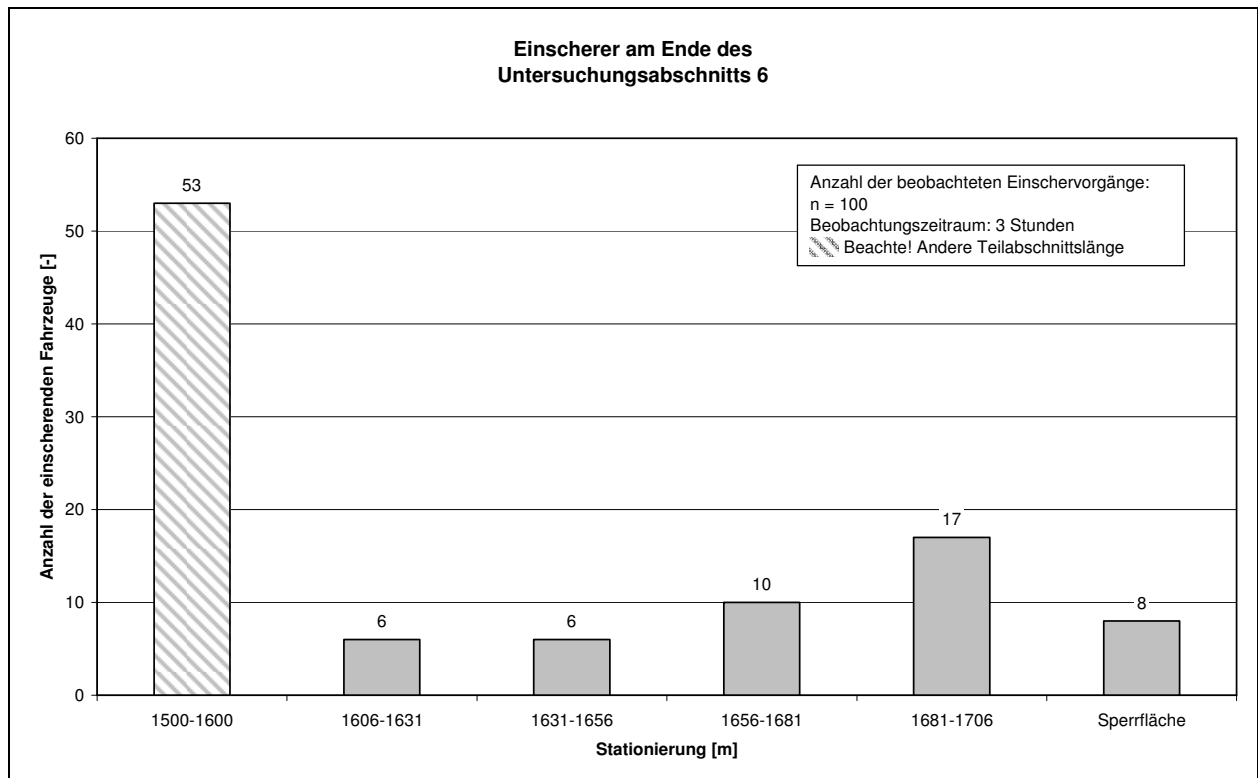
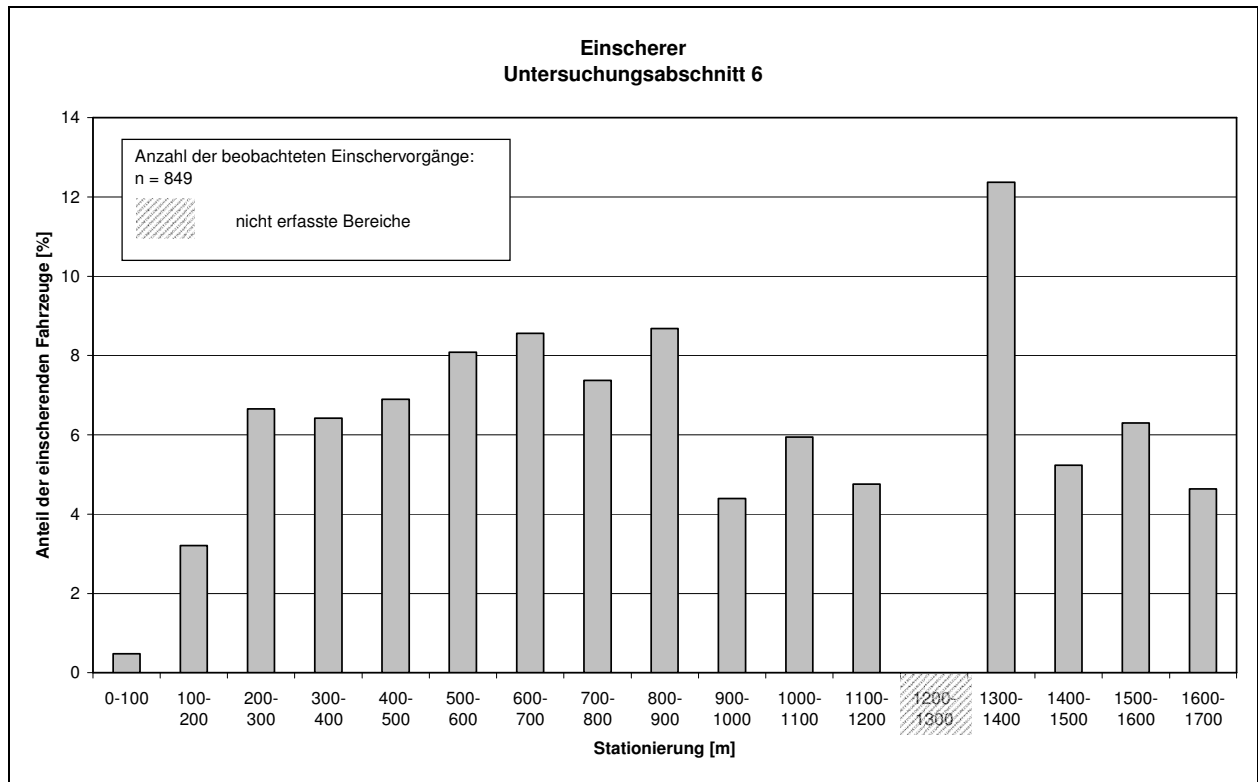


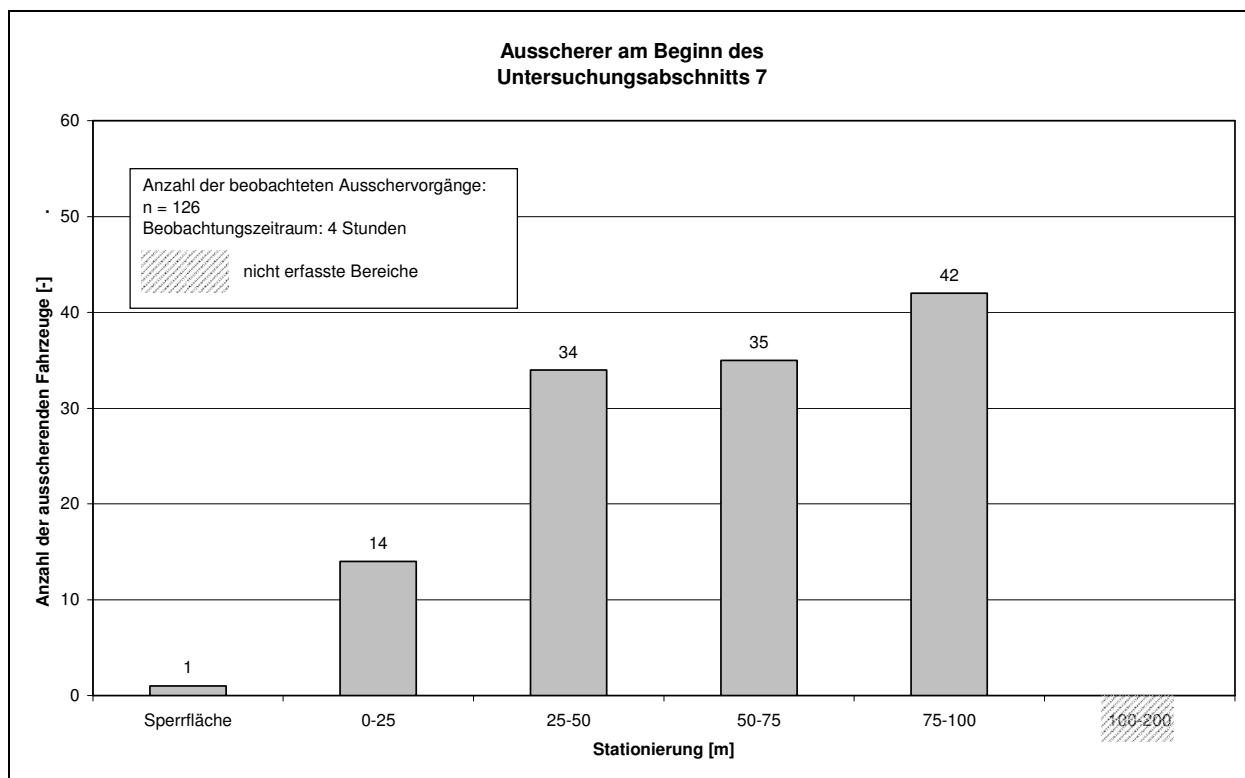
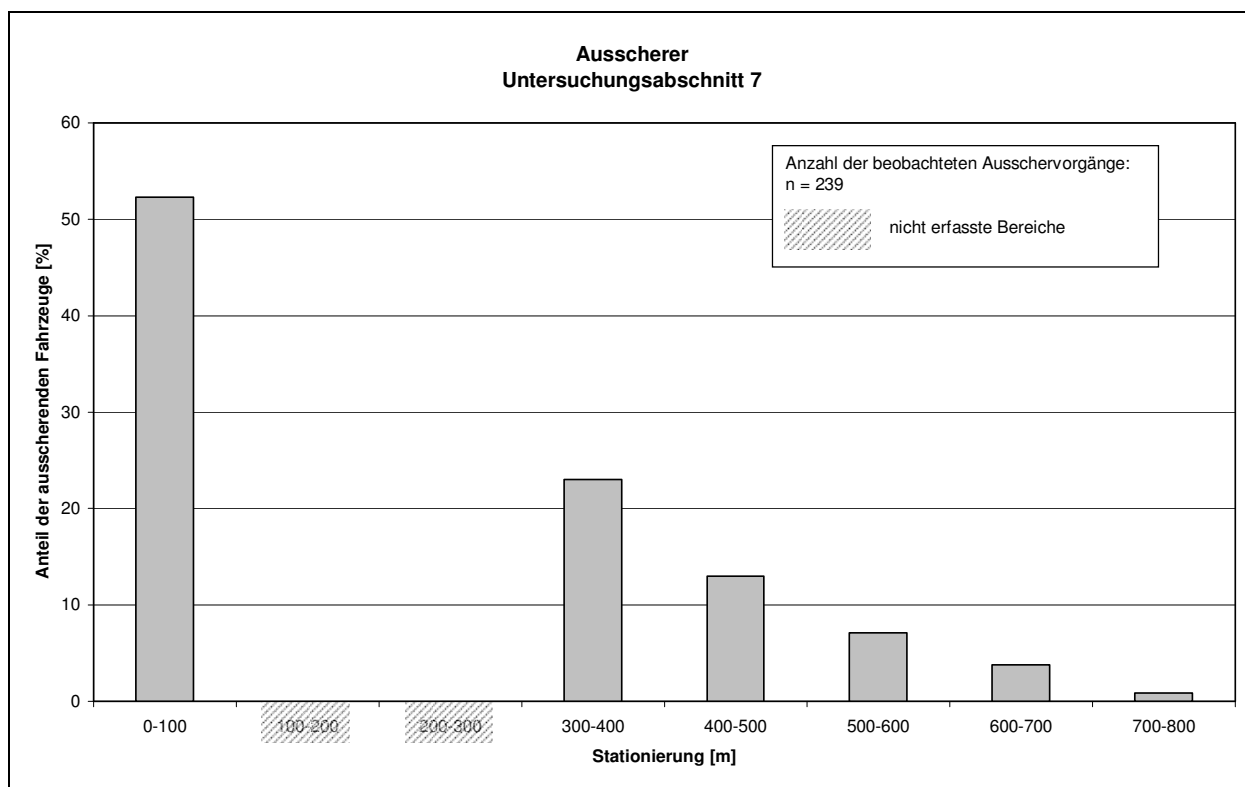


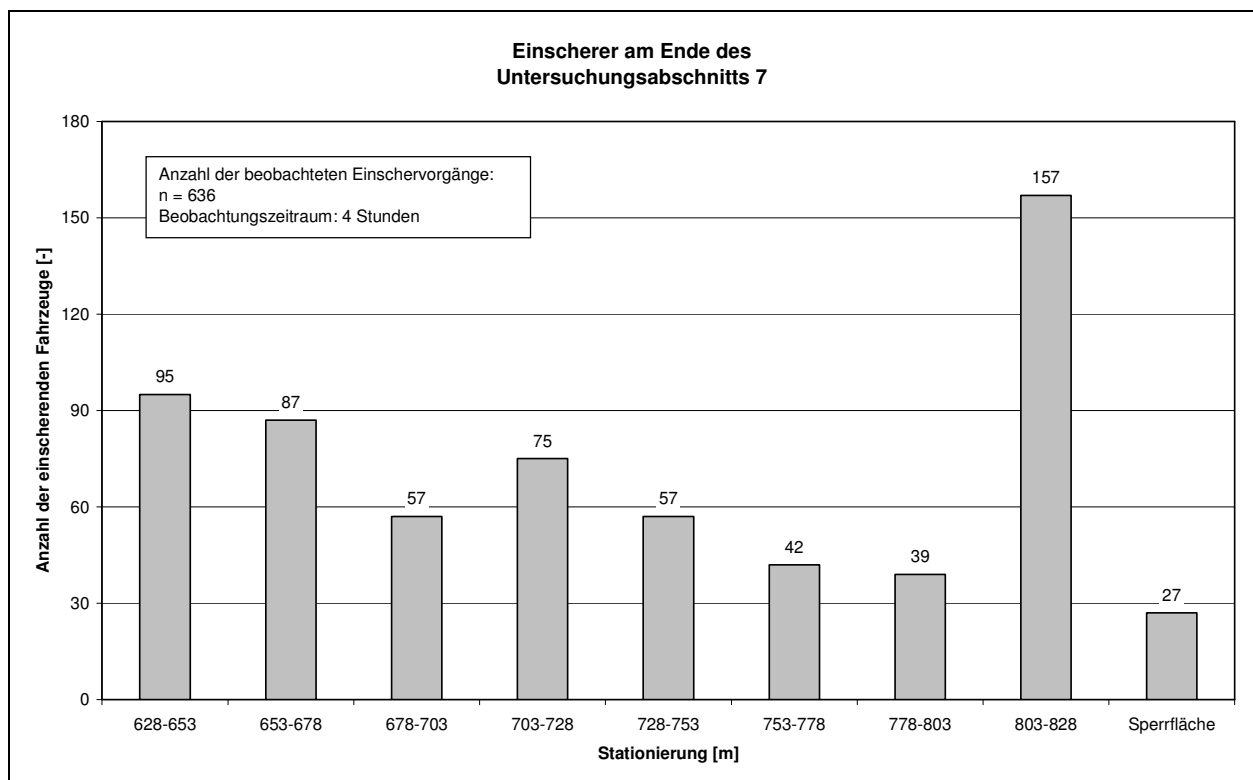
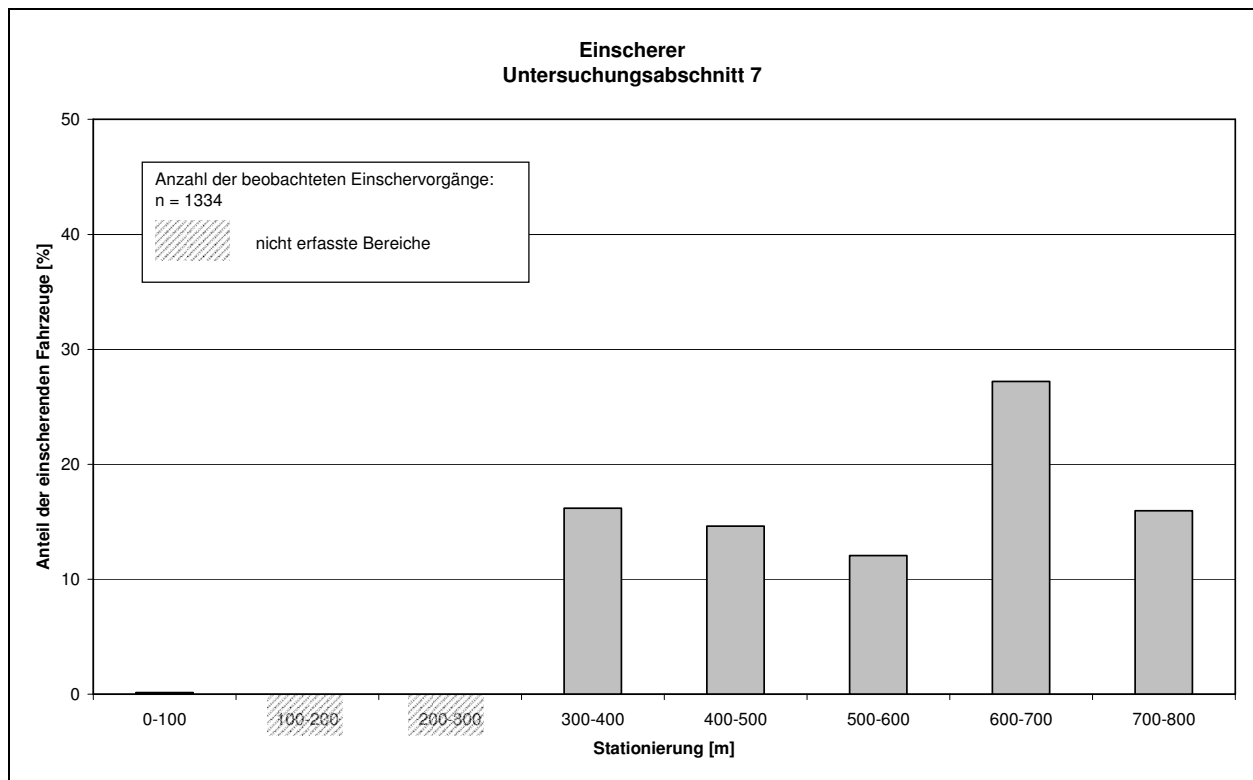


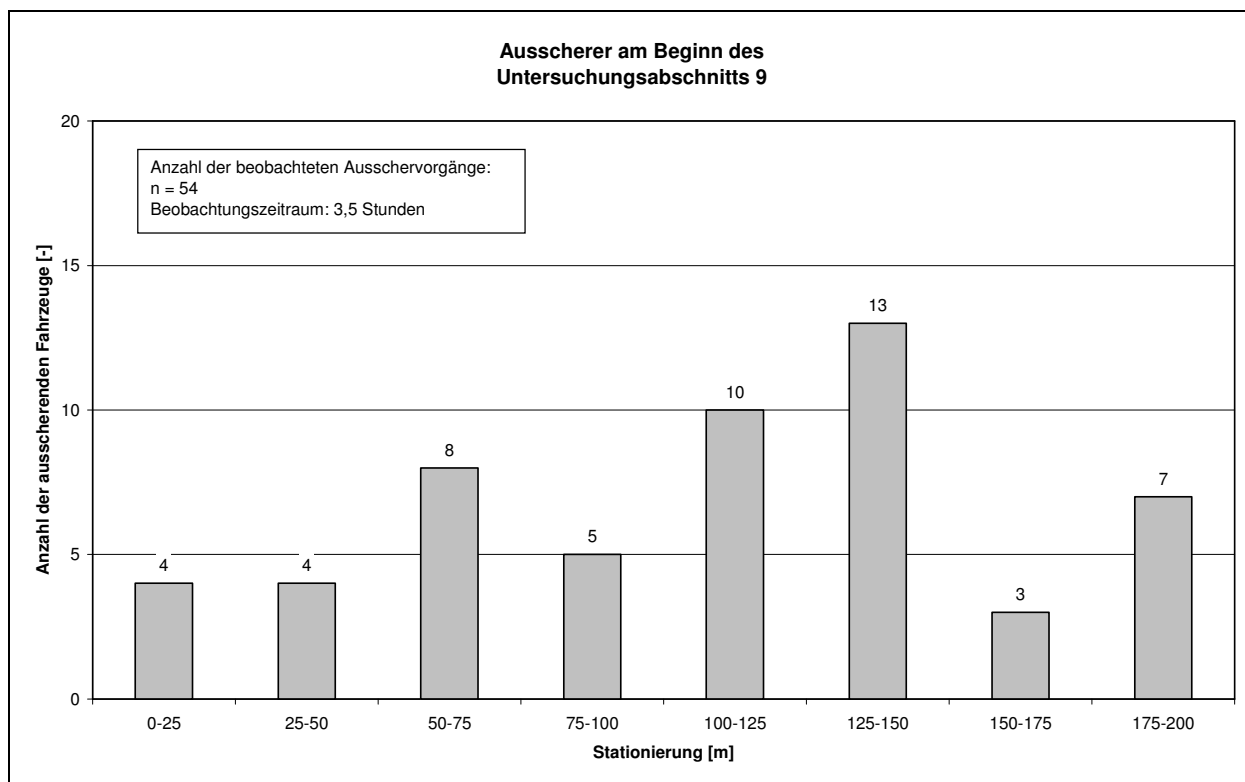
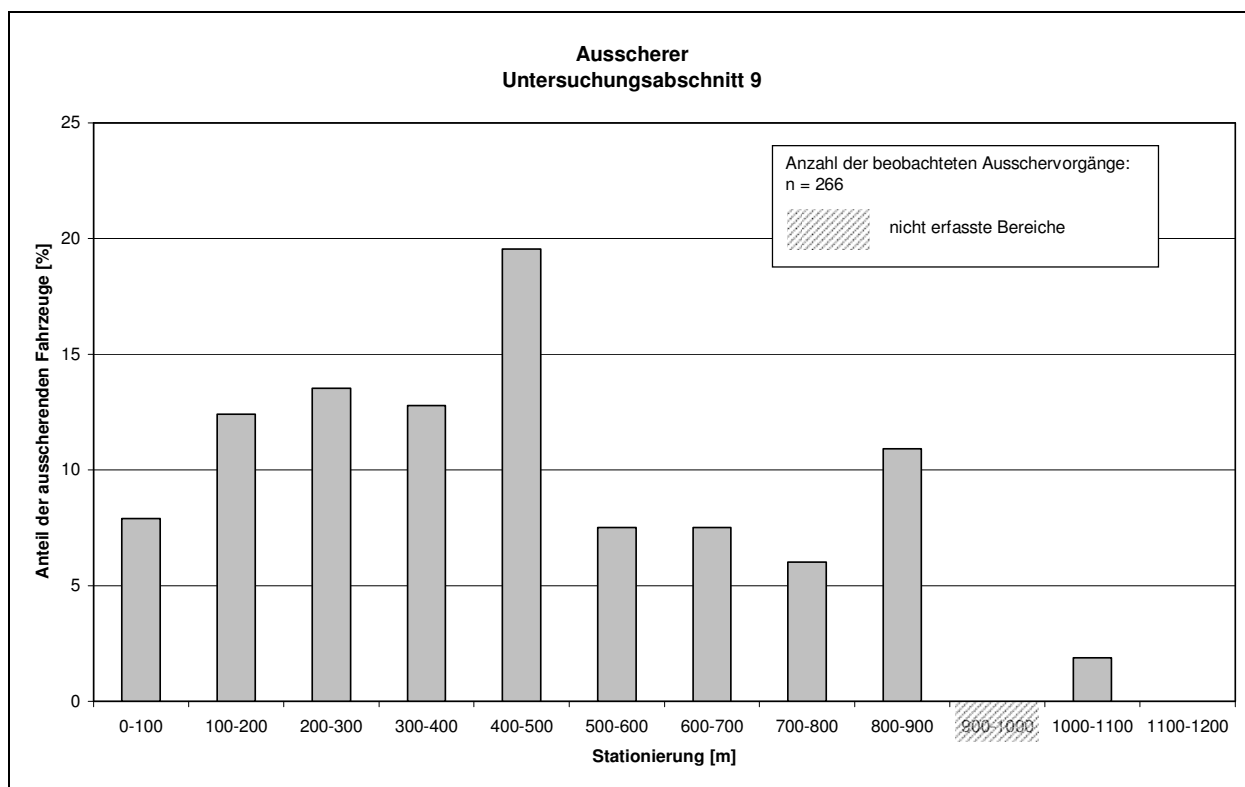


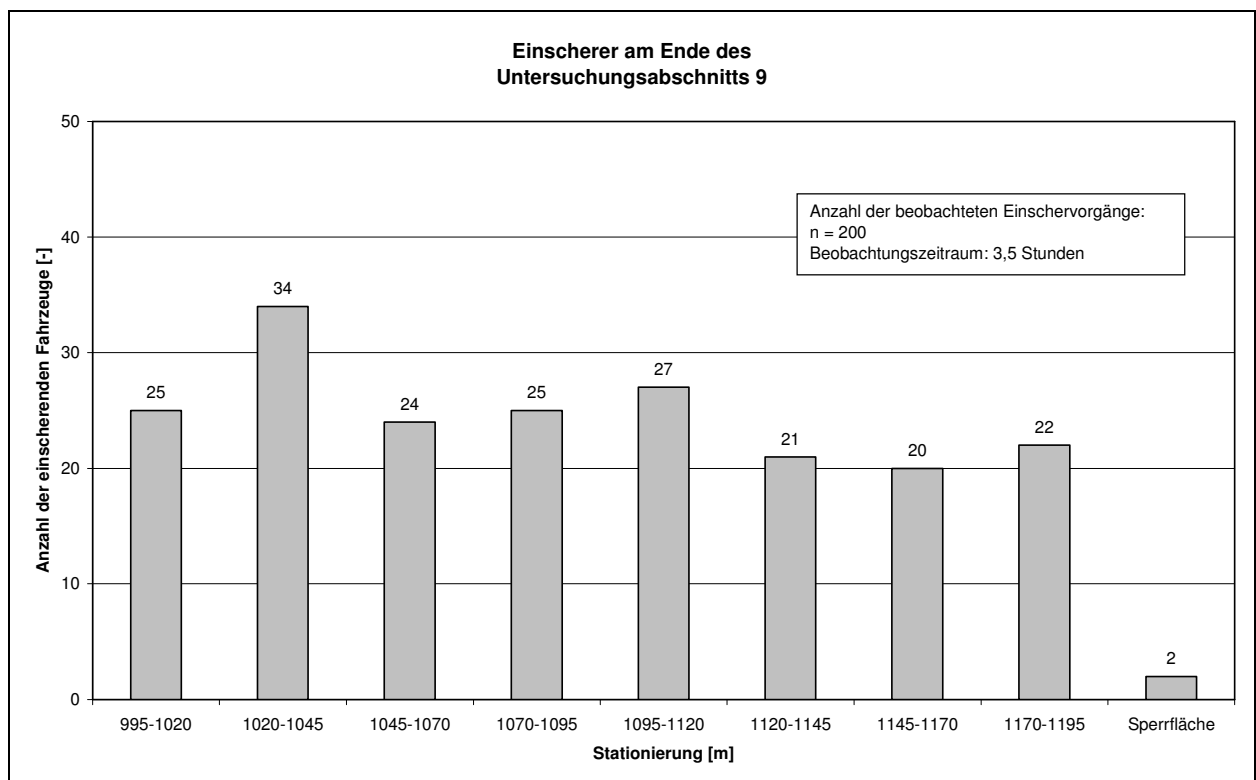
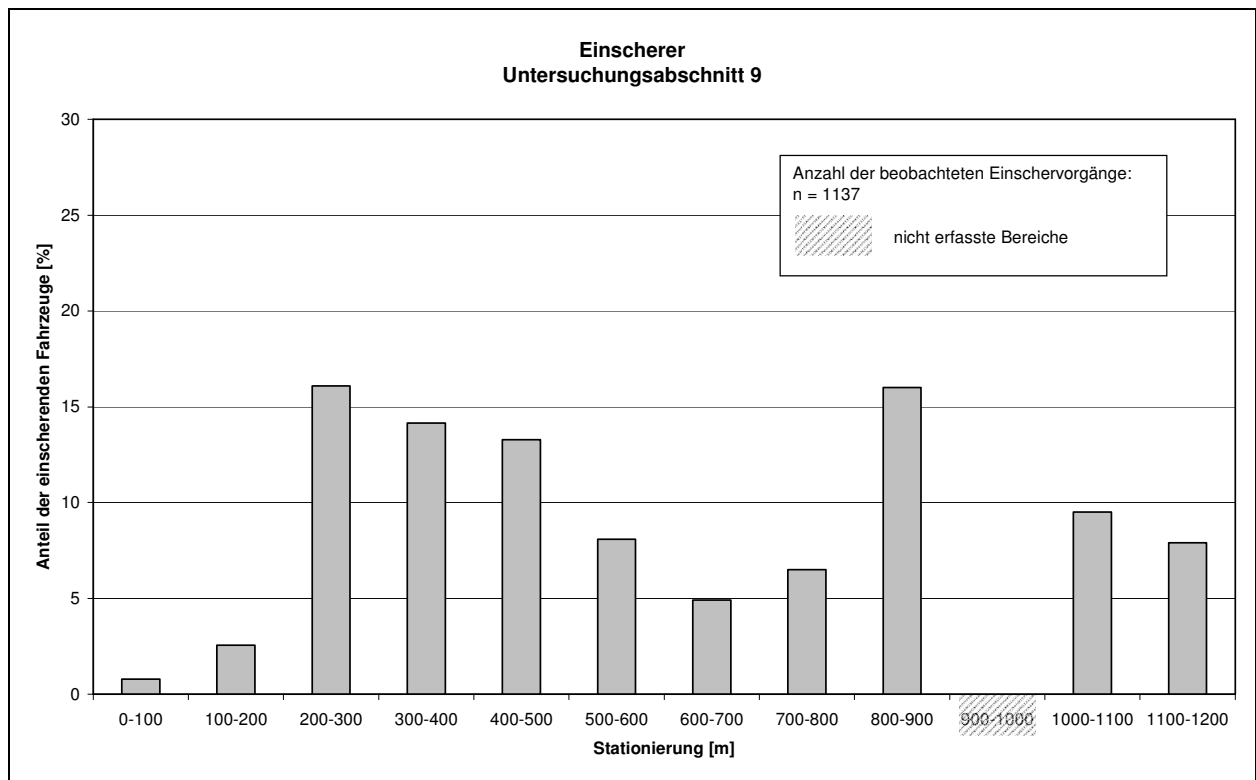


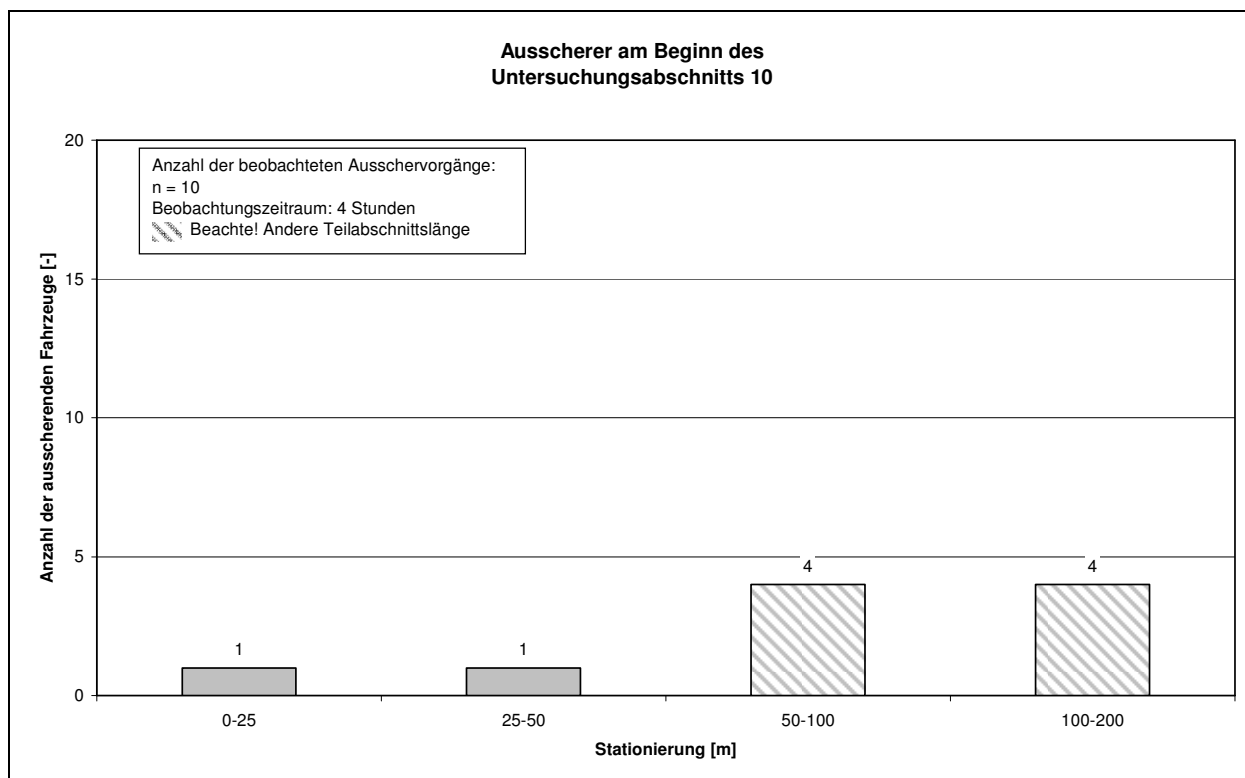
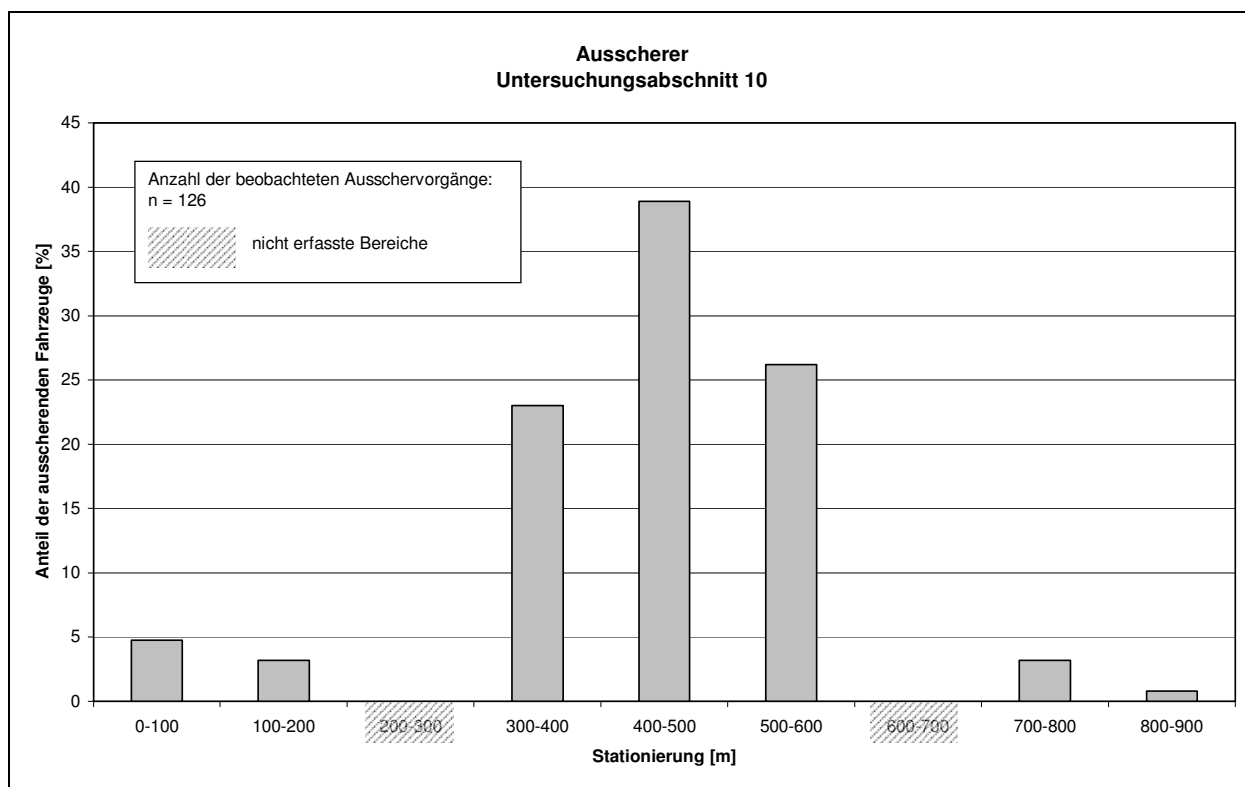


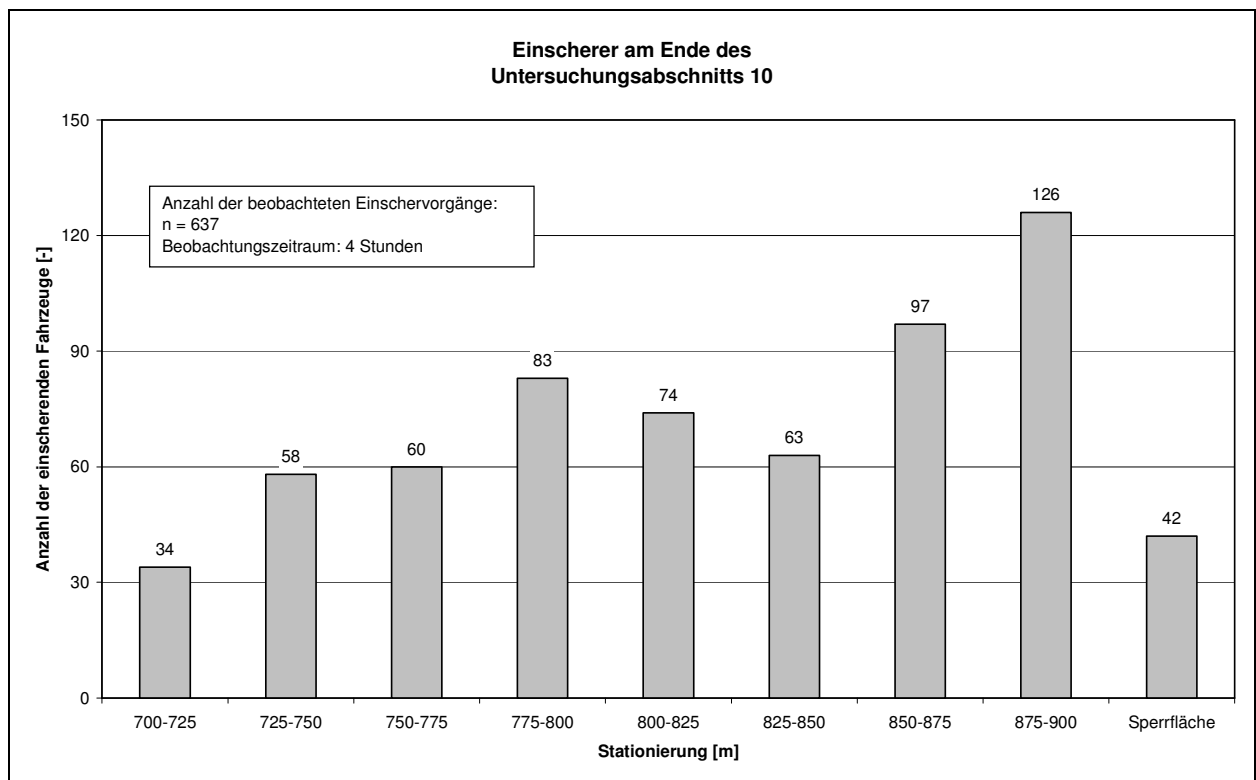
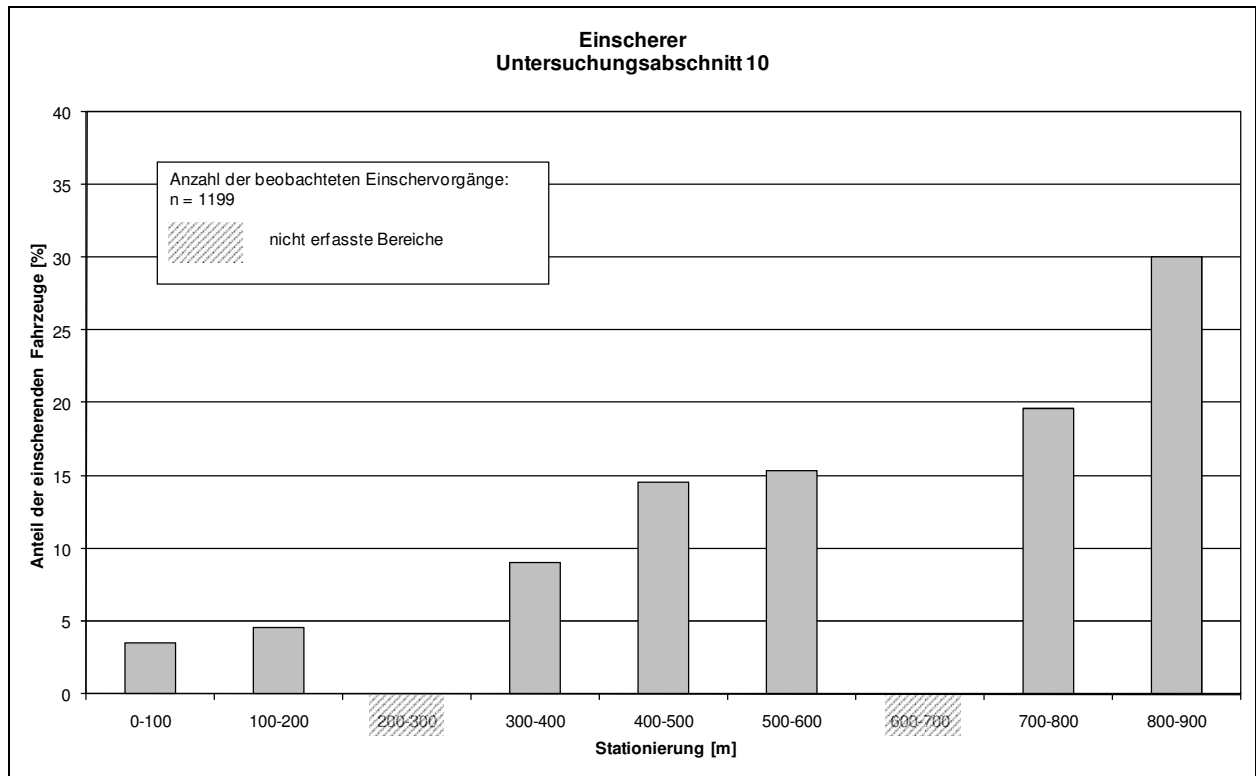


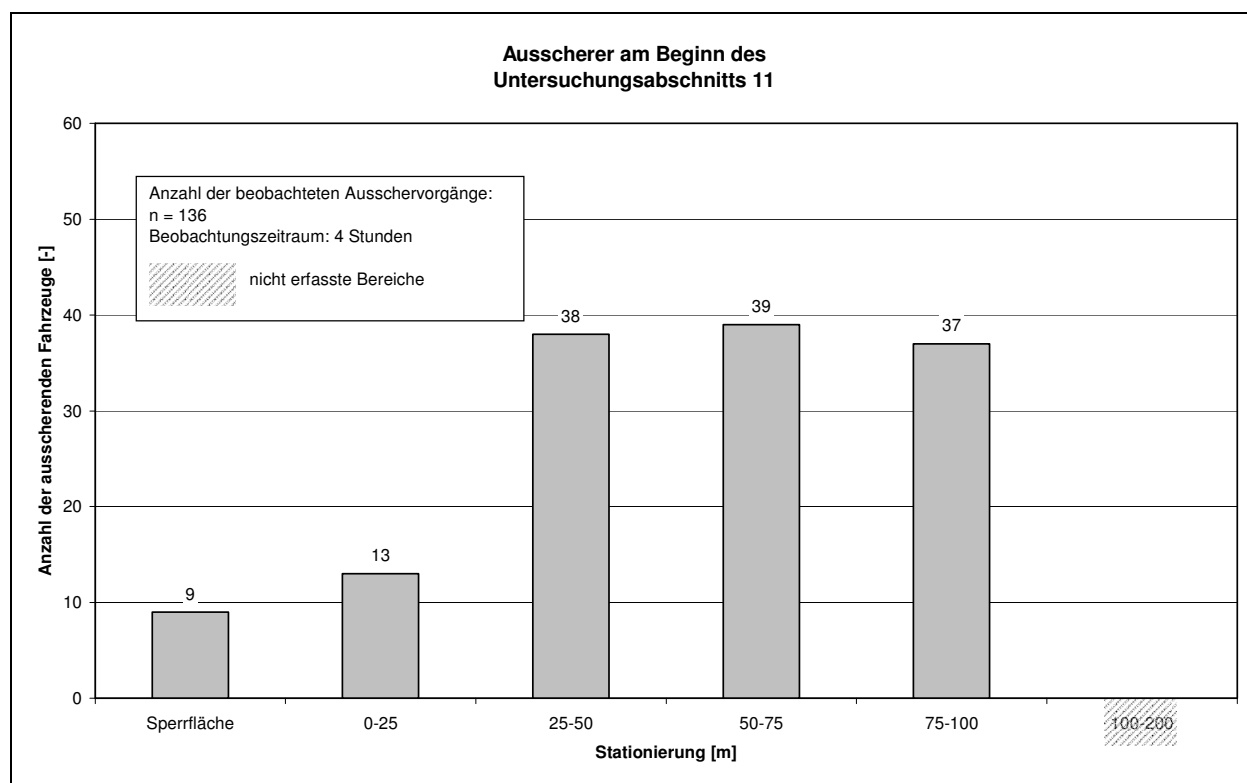
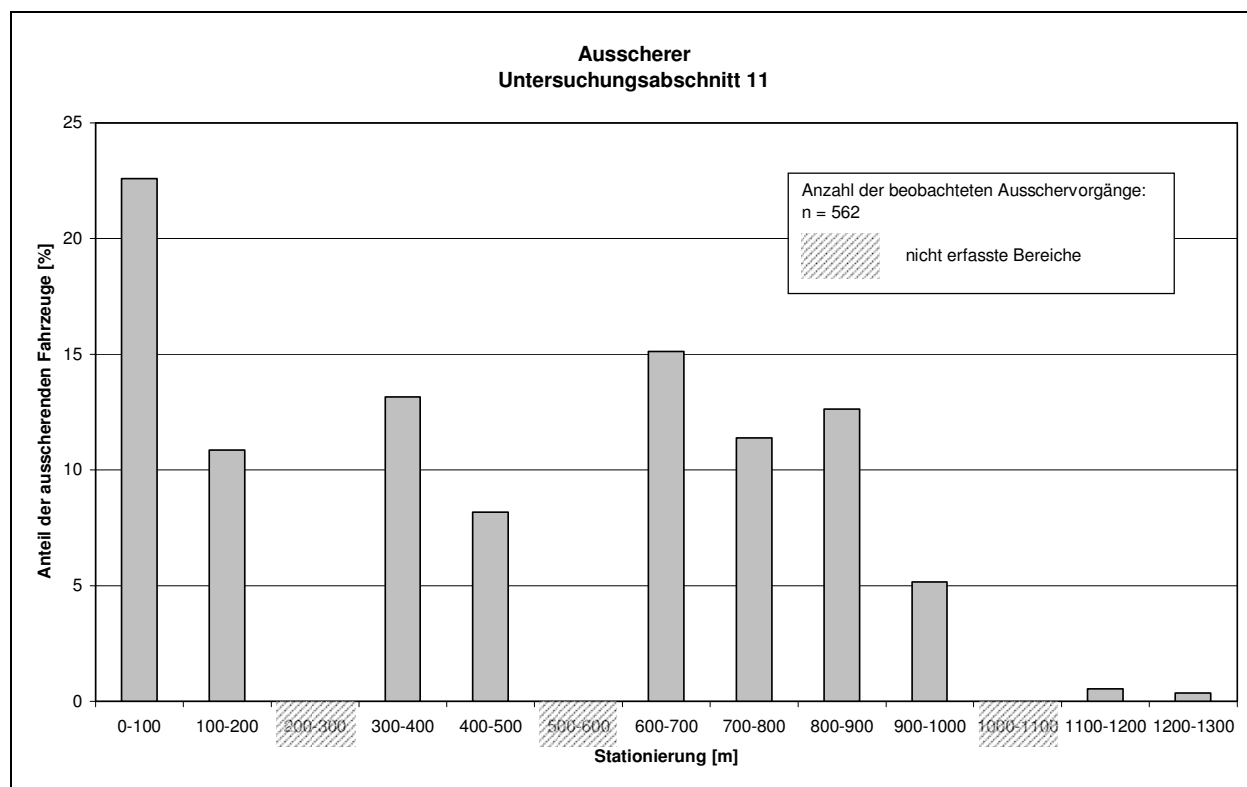


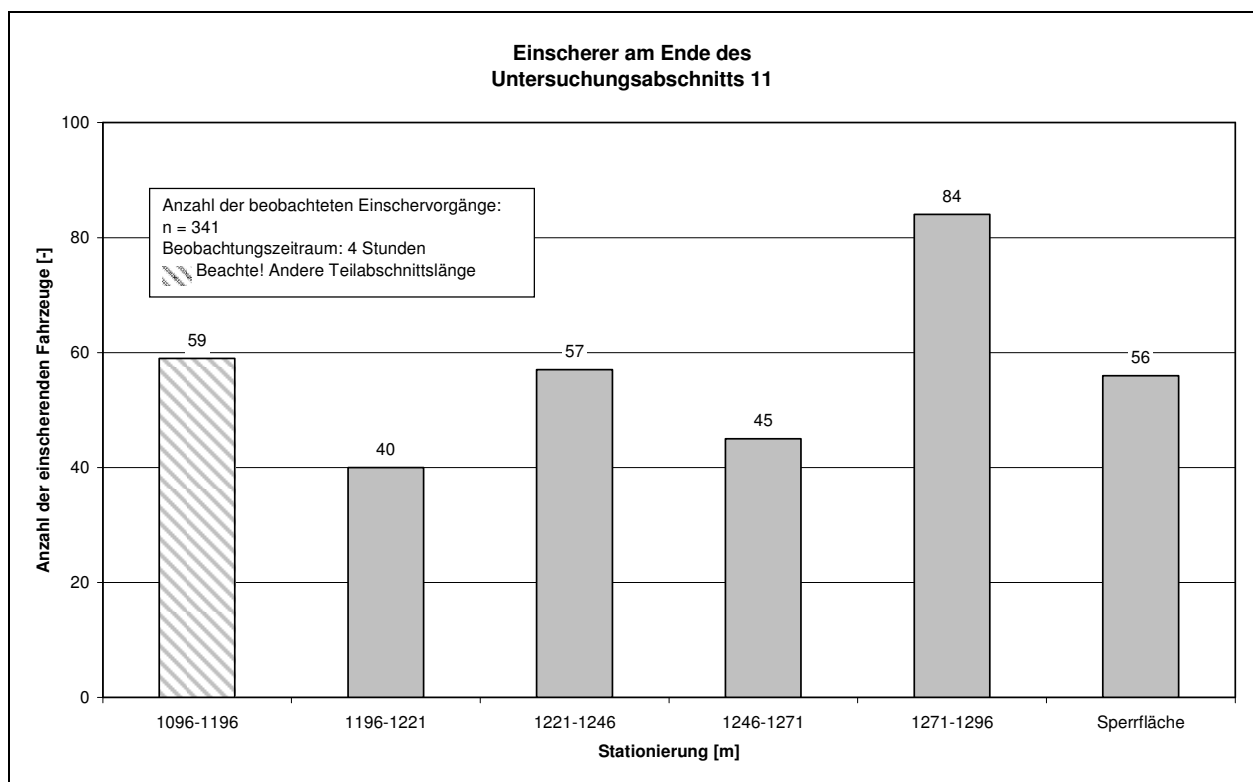
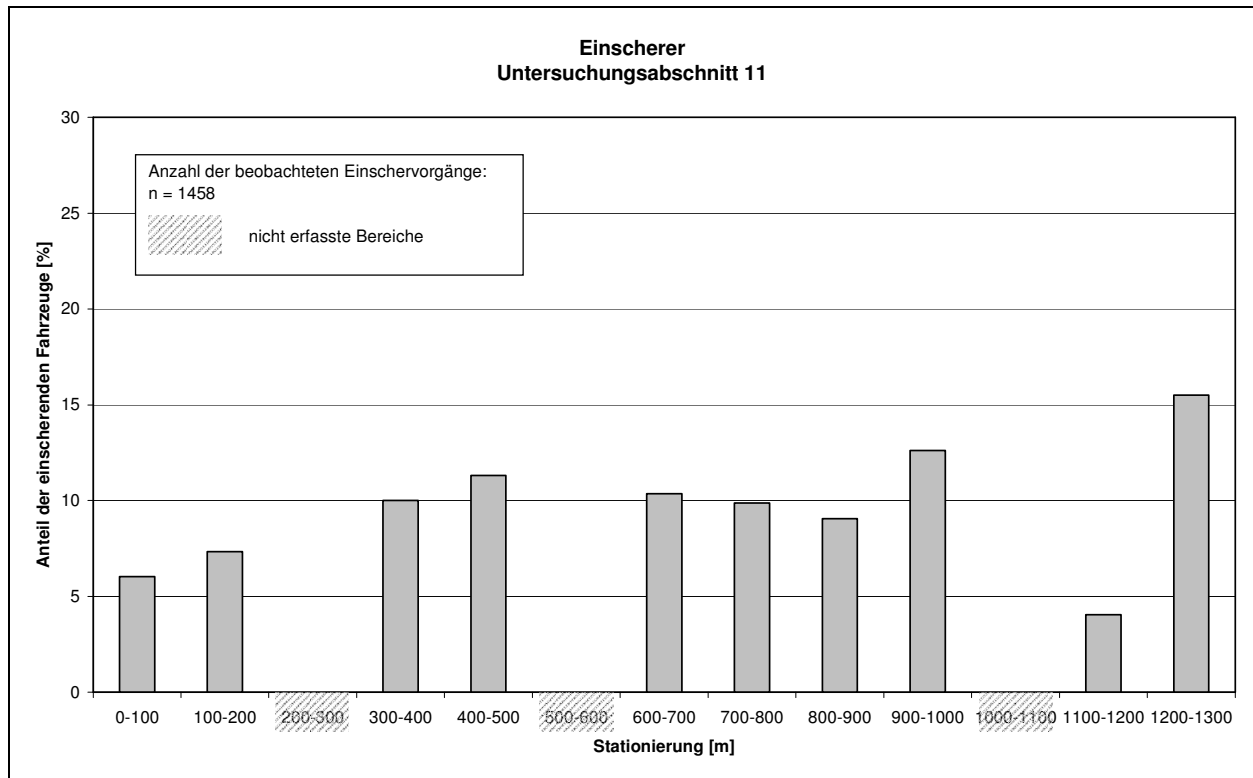


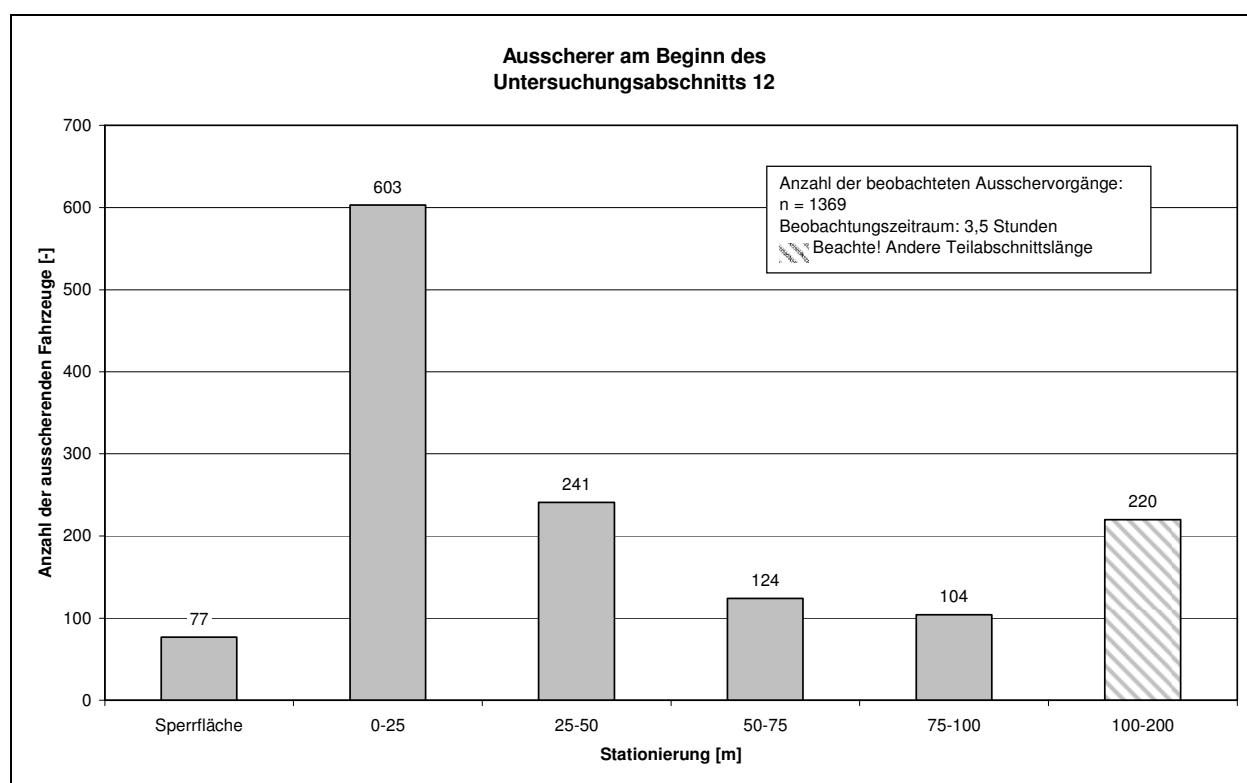
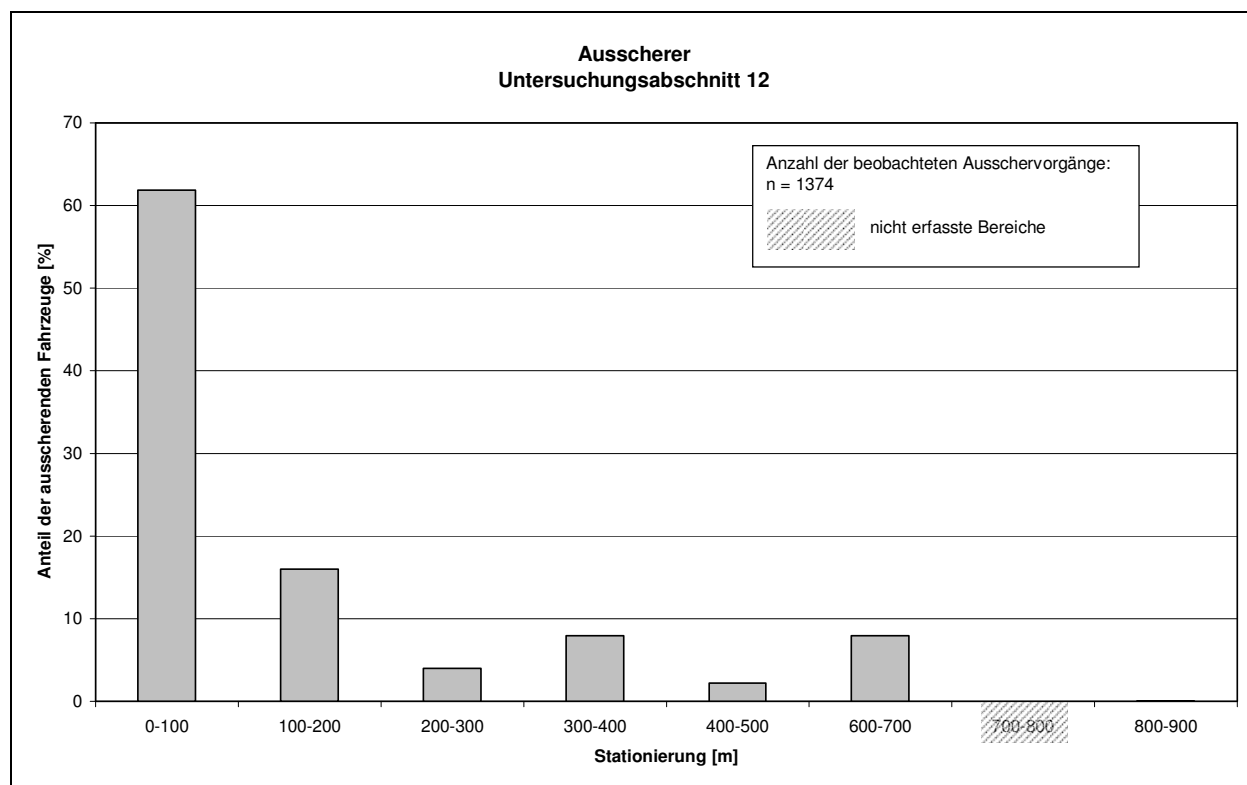


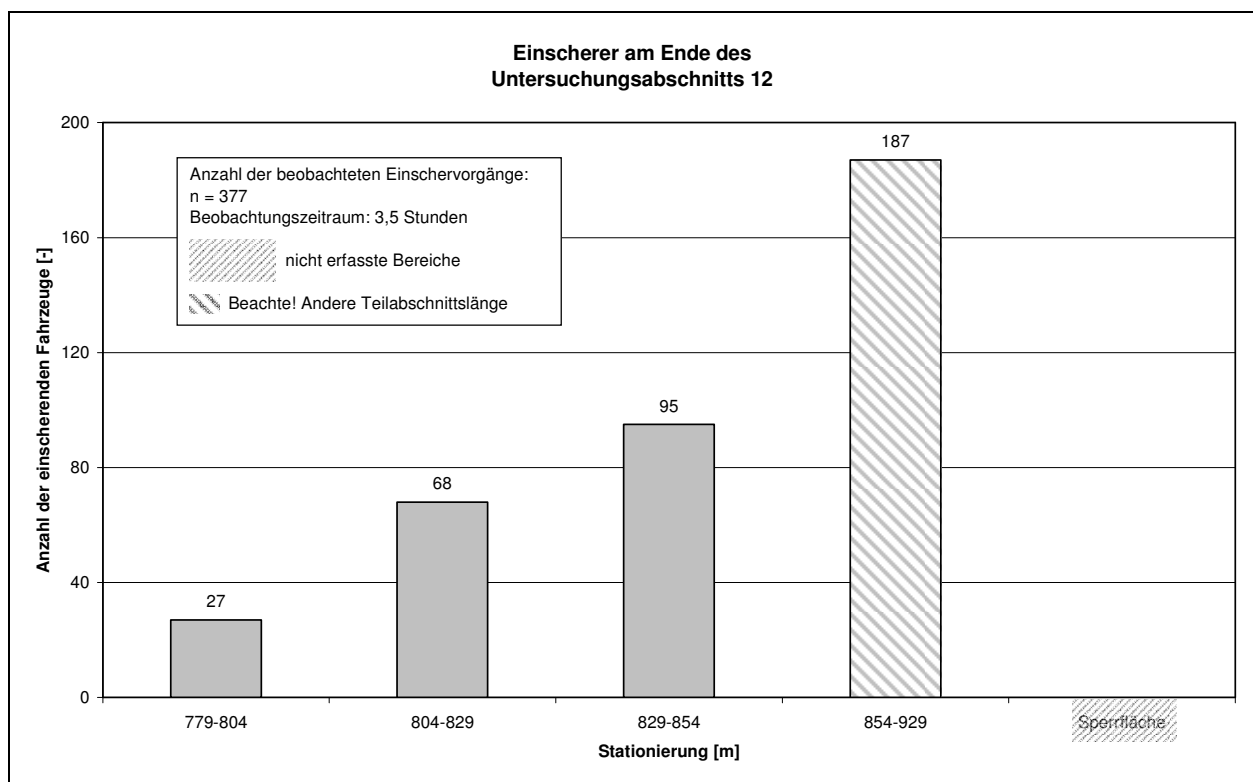
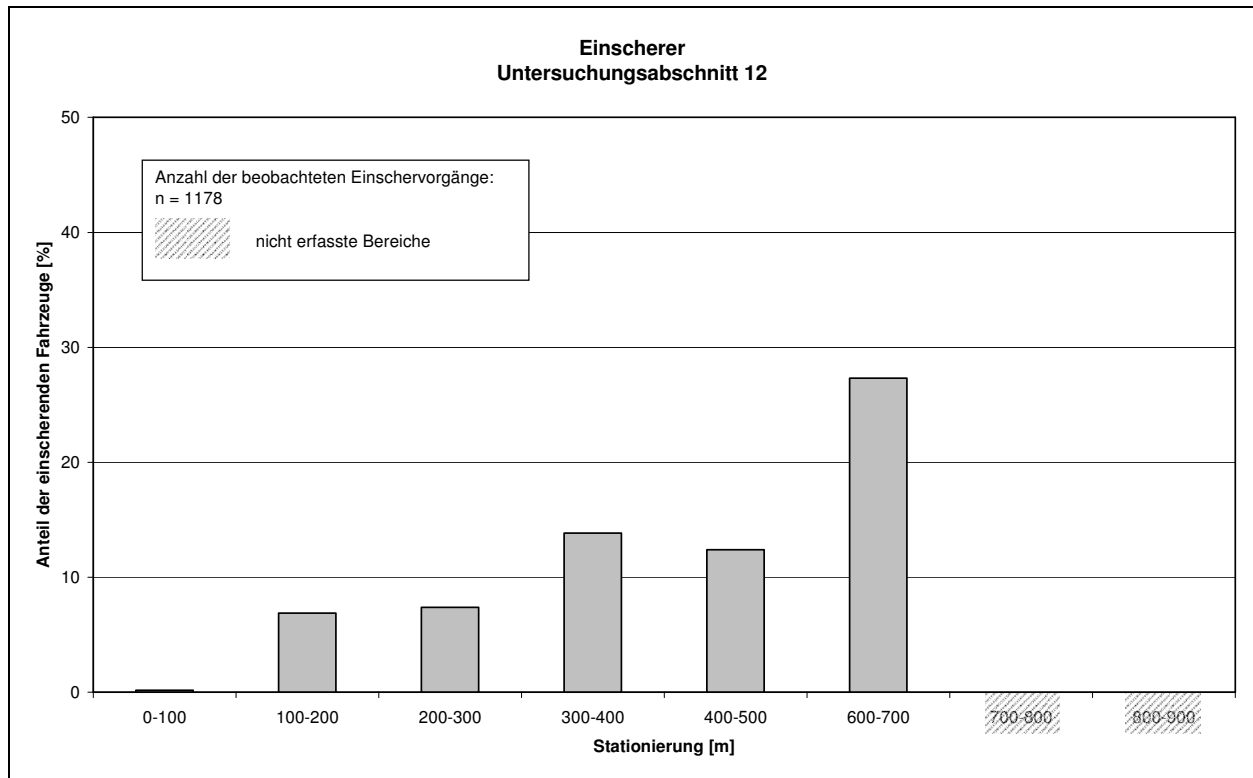


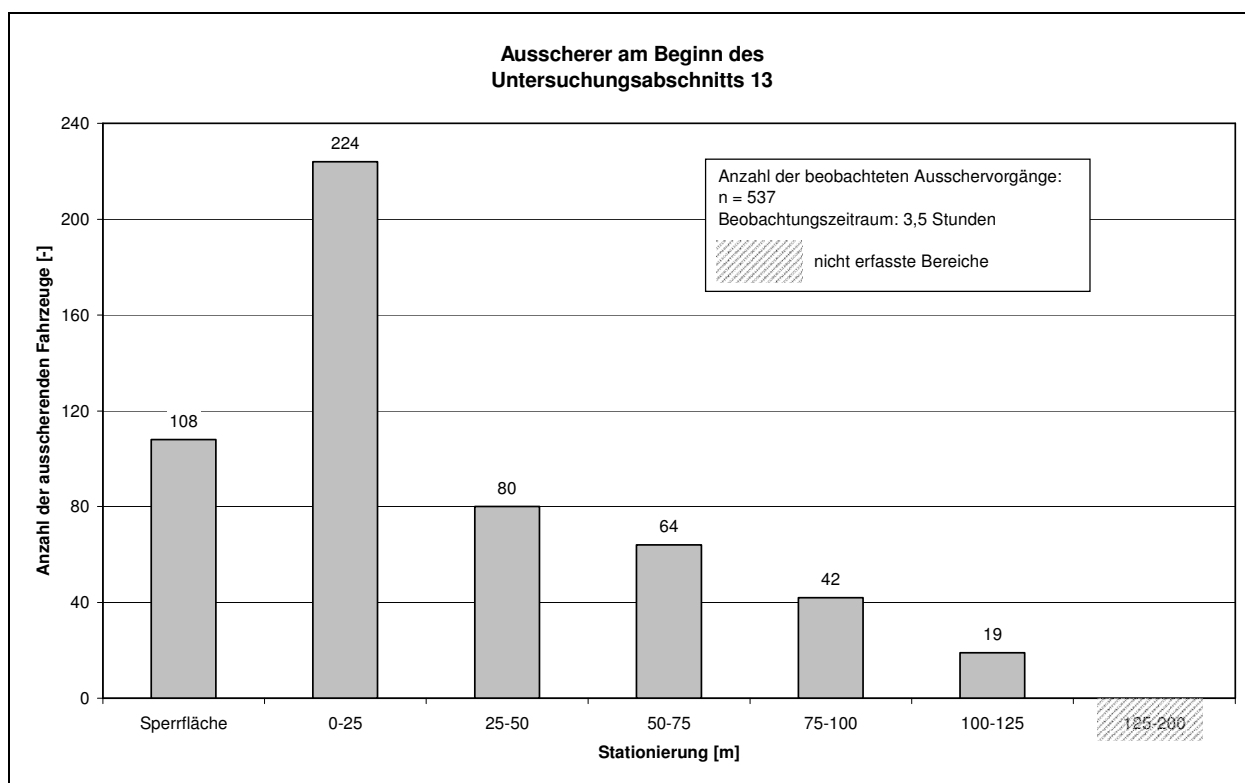
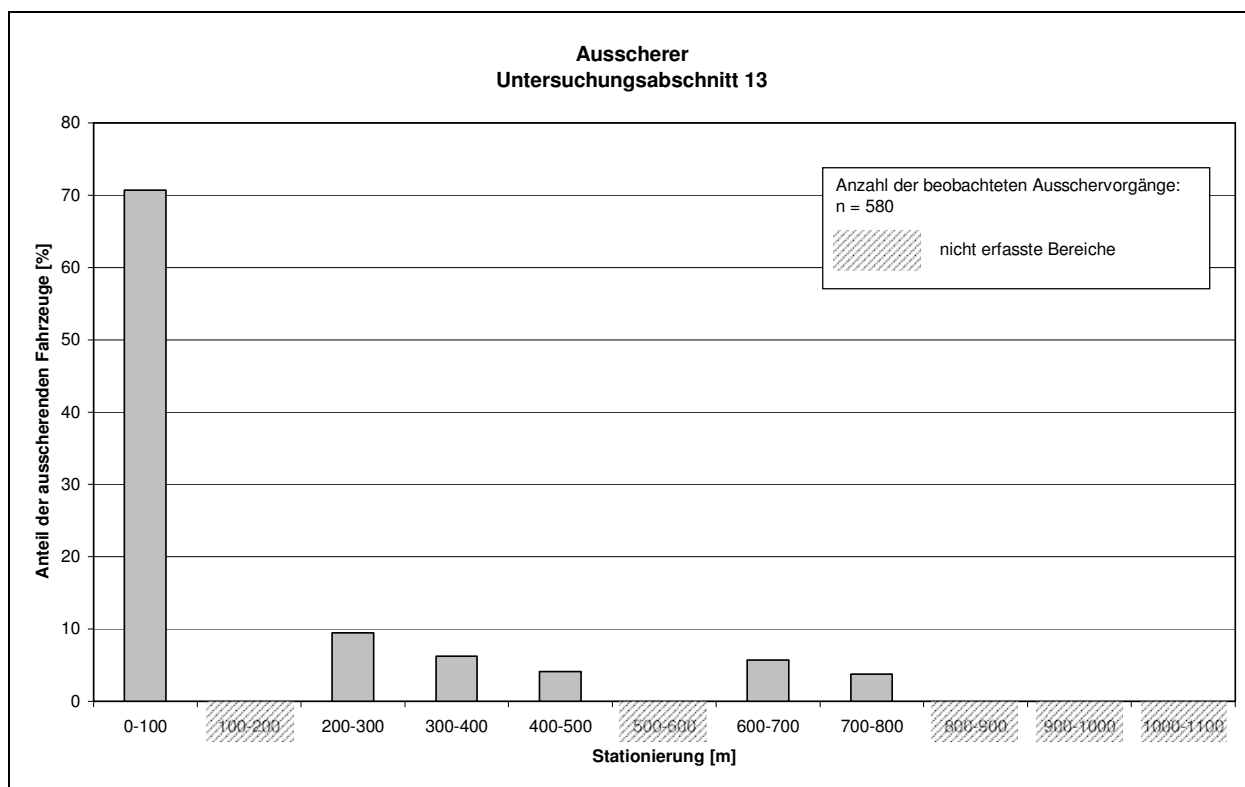


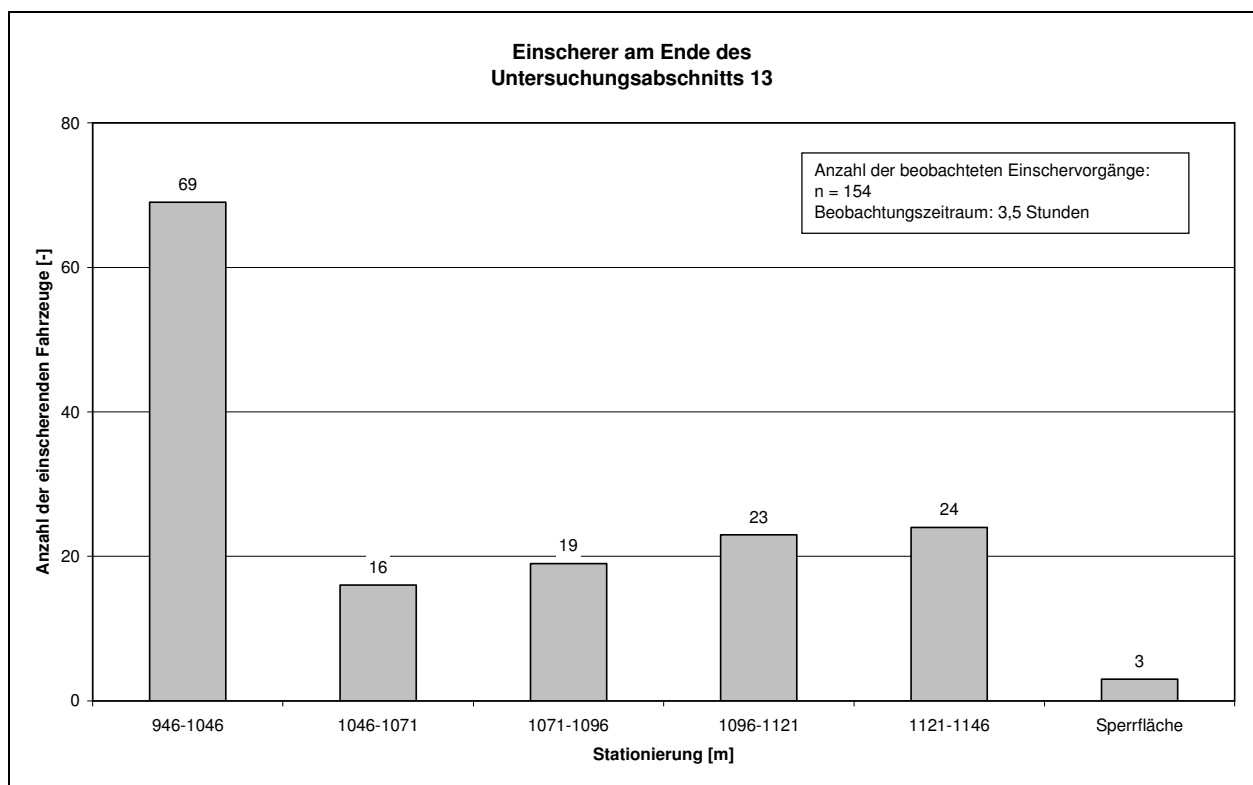
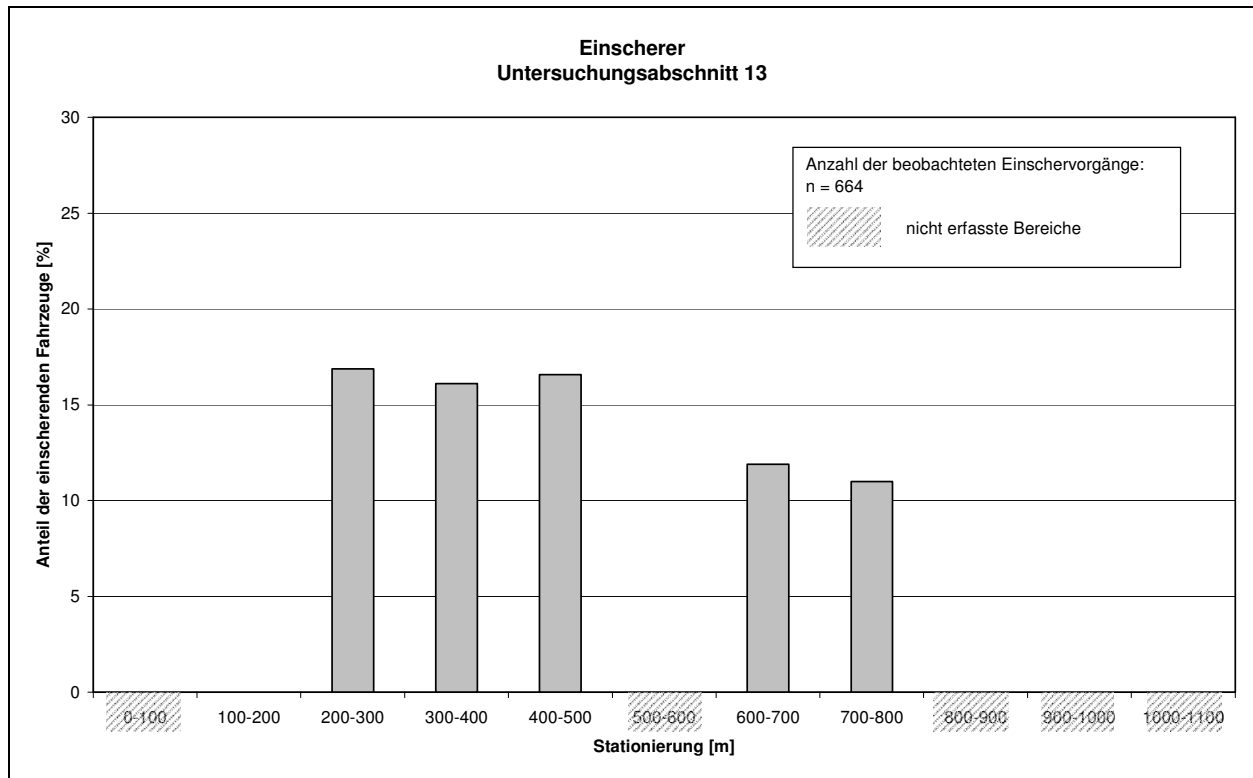




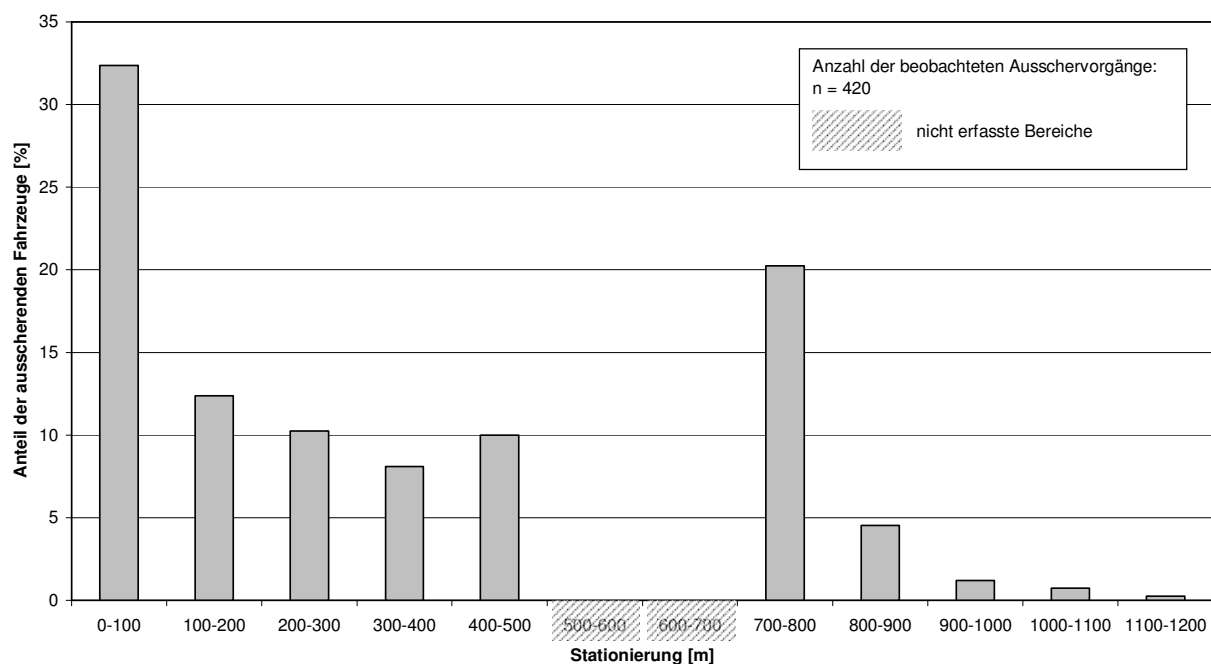




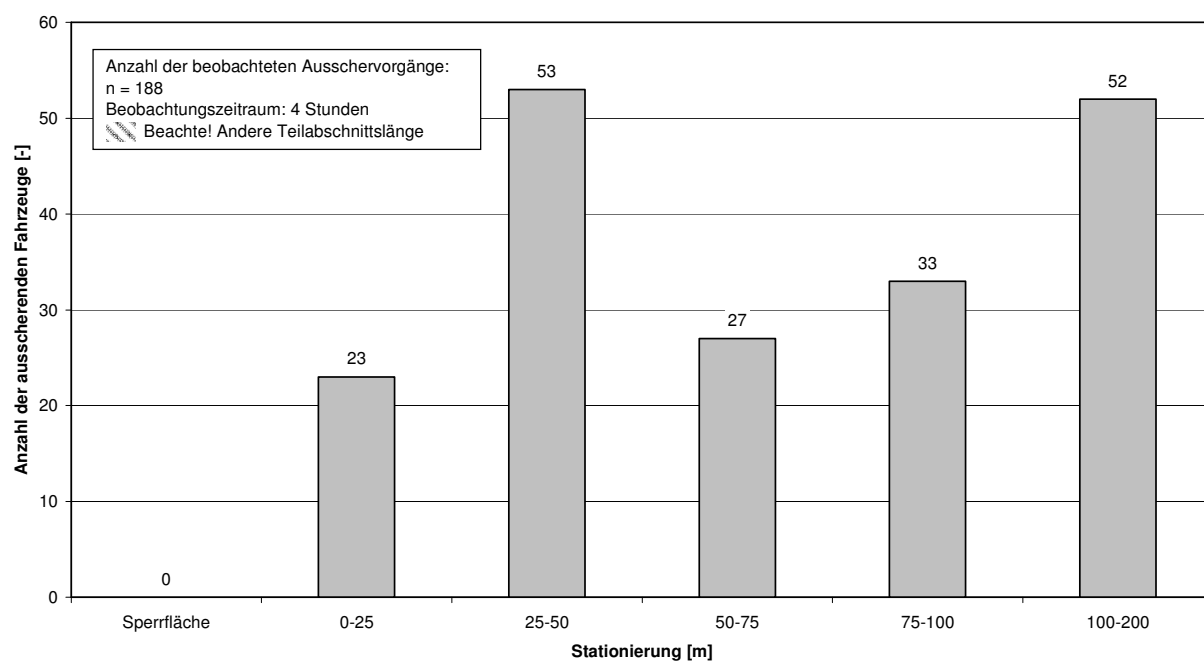


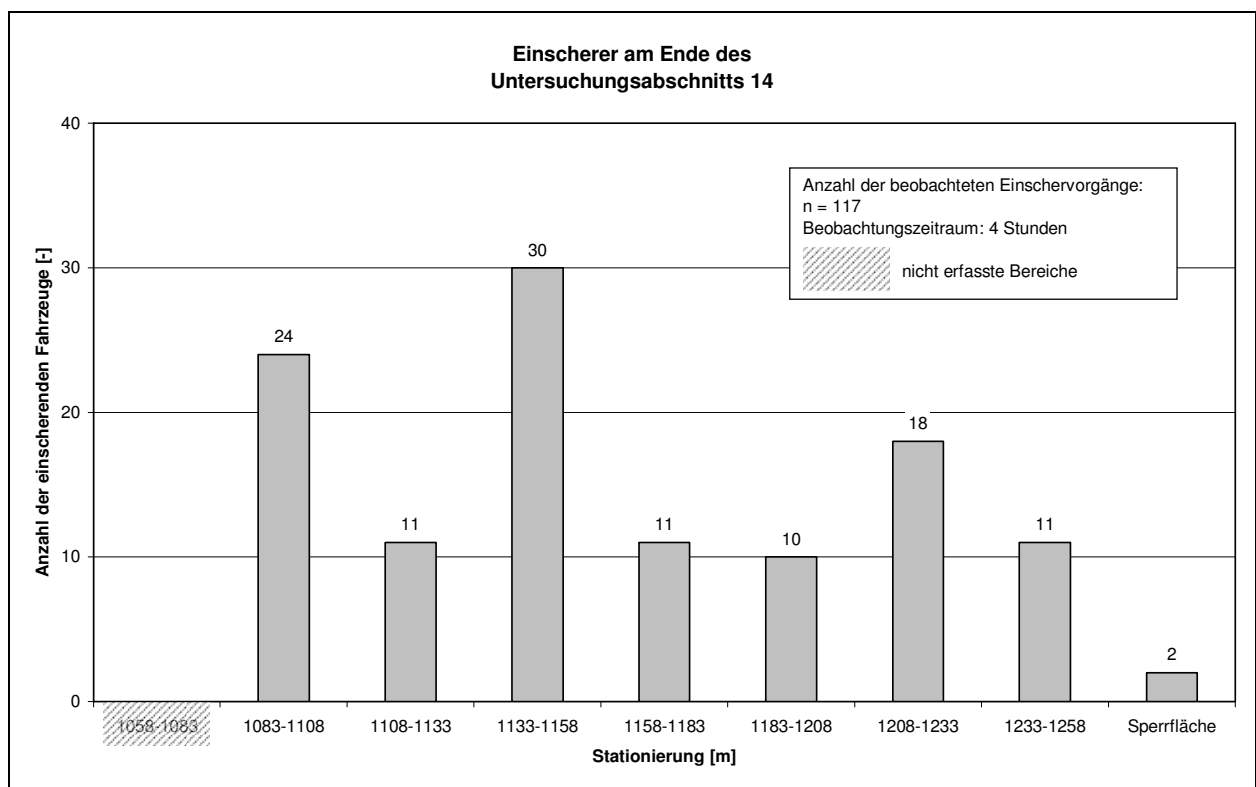
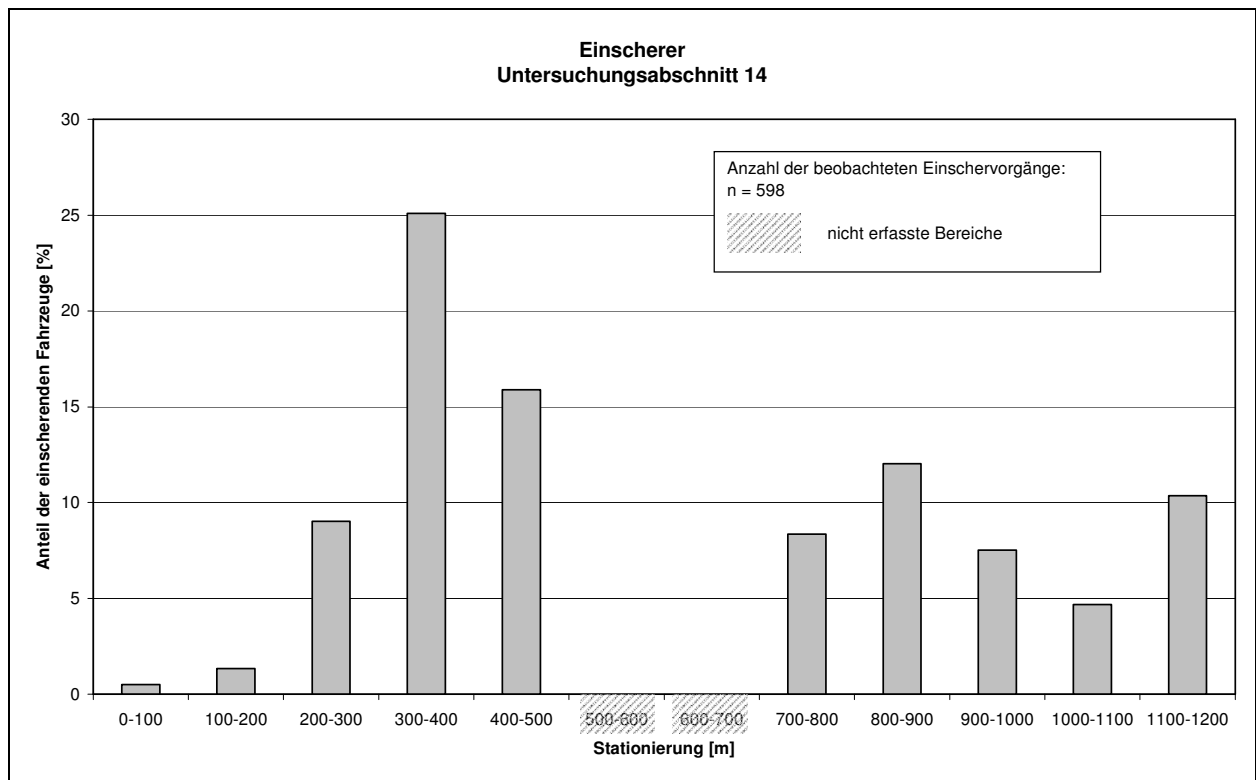


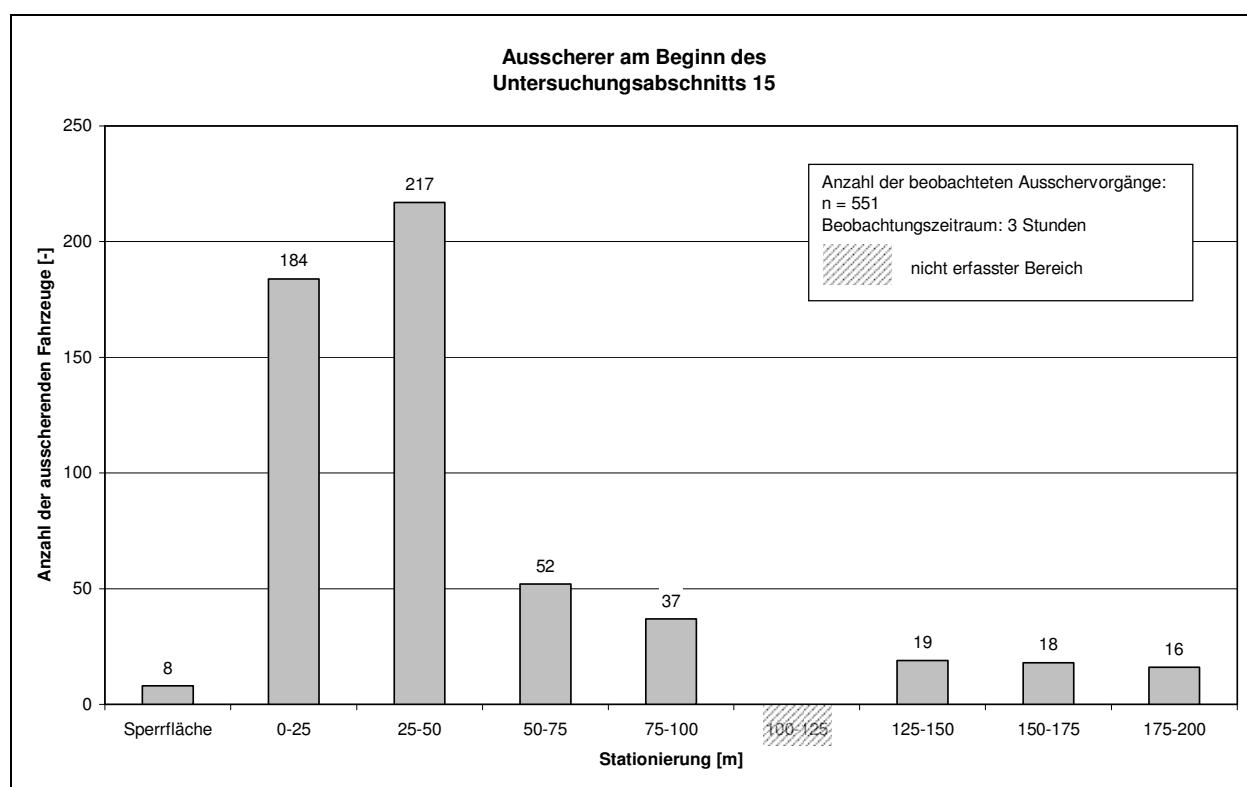
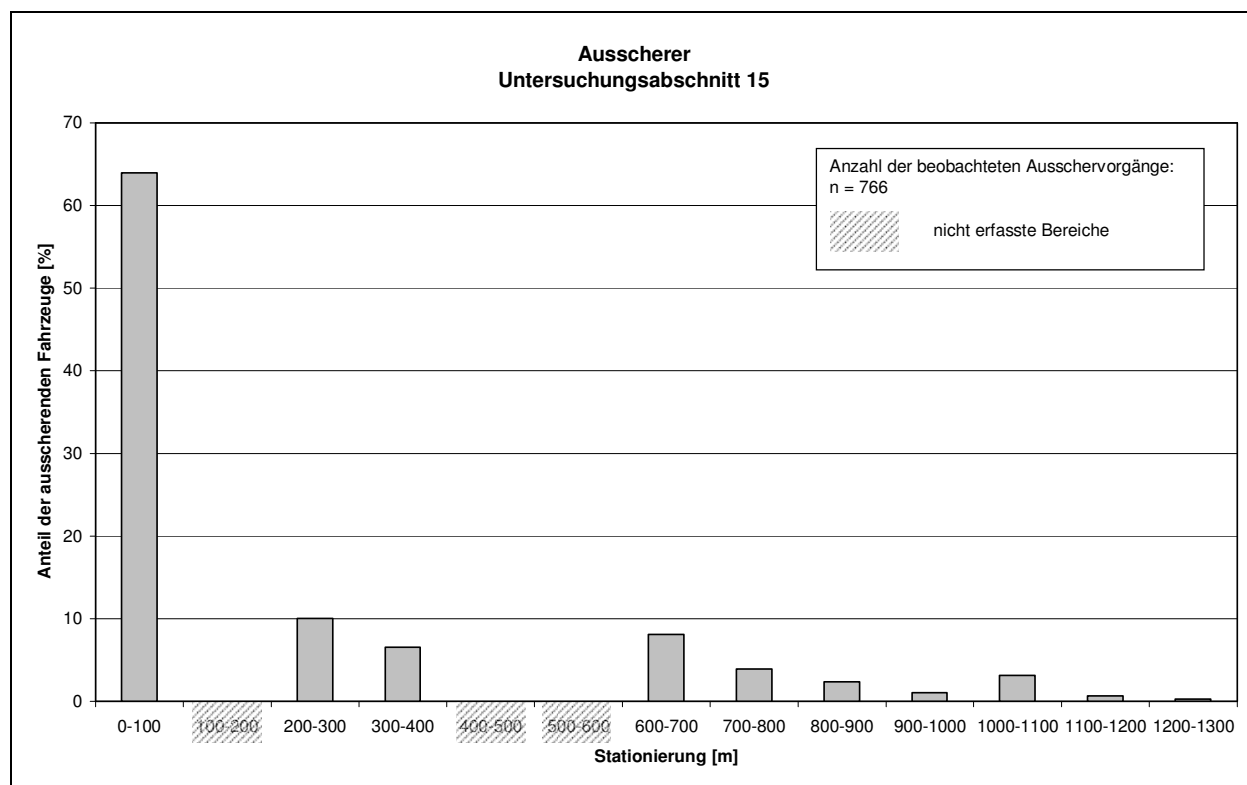
Ausscherer Untersuchungsabschnitt 14

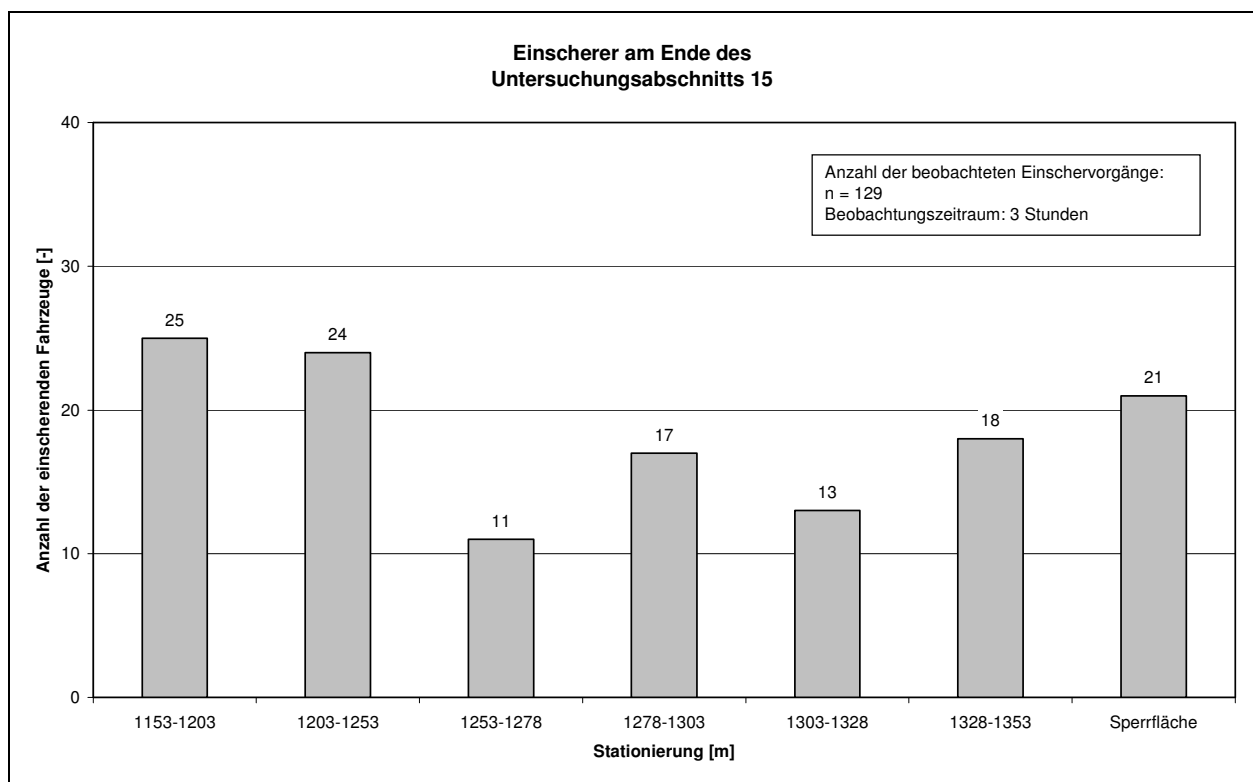
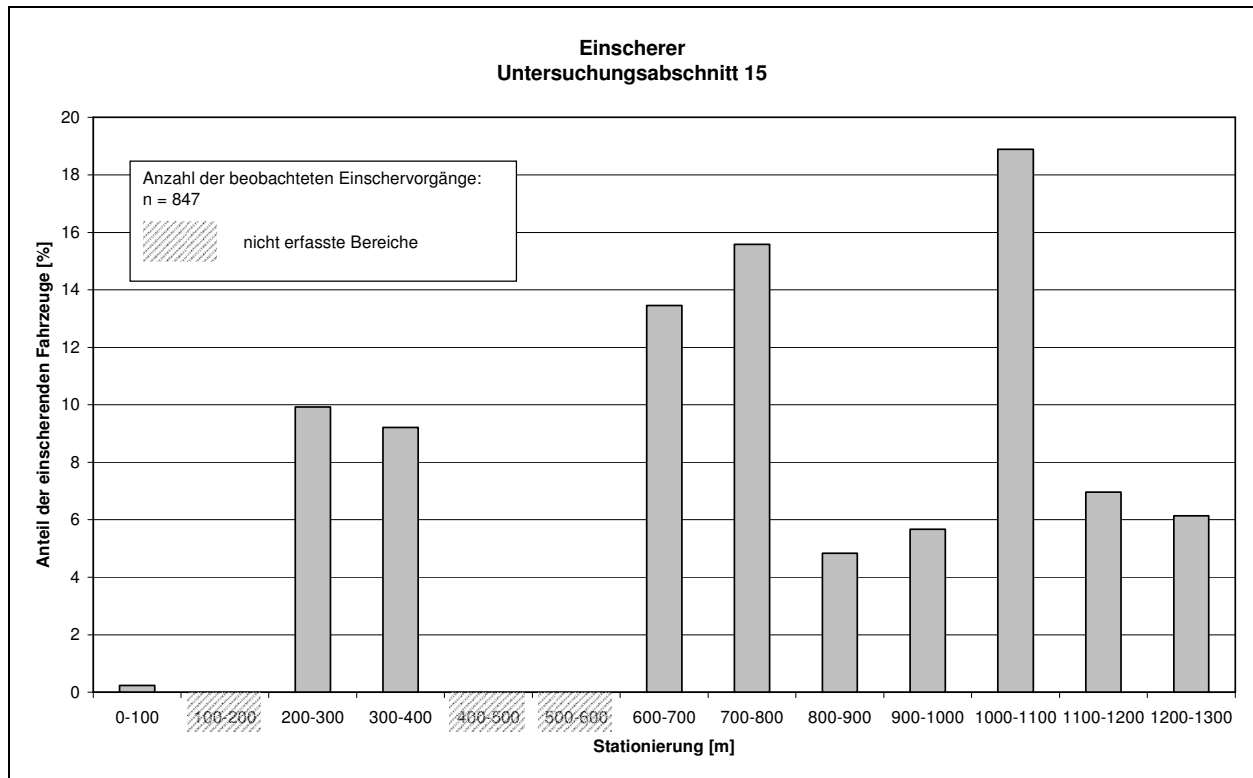


Ausscherer am Beginn des Untersuchungsabschnitts 14









A 5 Überprüfung des zur Bestimmung des Pulkanteils von TRAPP aufgestellten Modells (vgl. Gleichung 2.6) anhand Vorlaufstrecke Nr. 14

In Gleichung 2.6		14:50-15:50	15:50-16:50	
streckencharakteristische Geschwindigkeit	$V_0 =$	90	90	[km/h]
Verkehrsmenge in Fahrtrichtung	$x_1 =$	366	387	[Fz/h]
Verkehrsmenge des Gegenverkehrs	$x_1^* =$	717	734	[Fz/h]
SV-Anteil in Fahrtrichtung	$x_2 =$	14	13	[%]
Kurvigkeit	$x_5 =$	0	0	[gon/k m]
Streckenanteil mit Sichtweiten > 300 m	$x_8 =$	100	100	[%]
Längsneigung	$x_{10} =$	0	0	[%]
Pulkanteil Trapp	$K_v =$	34	36	[%]
Pulkanteil Abschnitt 14	$P_A =$	27	29	[%]

A 6 Schätzung des Pulkanteils auf Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken (Verfahrenvergleich mittels des Theil'sche Ungleichheitskoeffizienten U)

A 6.1 Schätzung Pulkanteil mit Gleichung 10.11

	Empirie		Modell		Vergleich
	Pulkanteil	Pulkanteil ²	Pulkanteil	Pulkanteil ²	(Diff. Pulkanteil) ²
	13,5	183,2	20,5	422,0	49,1
	6,4	40,7	19,6	384,6	175,0
	14,0	195,4	19,9	394,1	34,5
	4,8	23,1	19,6	383,1	218,1
	6,8	46,0	20,4	415,2	184,9
	9,0	80,8	20,4	415,8	130,0
	23,3	544,4	18,3	336,0	25,0
	14,9	221,0	17,1	292,4	5,0
	11,4	130,6	18,3	335,1	47,3
	18,3	336,1	19,0	361,1	0,4
	19,7	387,0	16,9	285,6	7,7
	26,4	697,0	23,6	556,8	7,9
	18,1	329,0	23,1	533,6	24,6
	19,6	385,4	21,6	464,7	3,7
	38,7	1497,2	23,7	561,4	225,0
	19,7	388,8	22,9	524,1	10,1
	17,9	318,9	23,8	566,8	35,4
	25,9	671,2	22,4	500,8	12,5
	23,9	572,3	21,0	442,8	8,3
	26,4	695,9	18,9	355,7	56,6
	46,3	2140,8	27,6	760,7	349,3
	36,6	1339,1	28,6	819,0	63,6
	40,1	1604,1	30,7	943,5	87,1
	35,4	1251,6	31,0	959,8	19,3
	31,4	983,1	30,4	926,1	0,9
	26,5	703,9	28,5	810,7	3,8
	28,1	788,5	26,6	706,5	2,3
	27,0	726,8	25,3	641,1	2,7
	35,9	1286,6	26,7	714,8	83,4
	29,8	889,5	34,6	1200,3	23,2
	22,3	497,8	27,0	730,8	22,3
	30,0	900,0	27,5	757,9	6,1
	26,7	713,7	24,8	615,4	3,6
	27,2	738,2	26,0	674,8	1,4
	32,0	1020,8	26,7	714,4	27,3
	28,8	827,5	27,4	751,6	1,8
	42,3	1793,4	34,6	1197,3	60,0
	32,7	1068,0	35,6	1267,8	8,6
	29,6	875,7	36,7	1350,1	51,2
	28,0	785,2	37,7	1423,1	94,1
	35,4	1255,7	34,9	1215,2	0,3
	31,4	986,0	33,8	1143,0	5,8
	40,5	1637,6	38,1	1450,6	5,7
	39,7	1577,6	34,1	1160,2	32,0
- Fortsetzung nächste Seite -					

	Empirie		Modell		Vergleich
	Pulkanteil	Pulkanteil ²	Pulkanteil	Pulkanteil ²	(Diff. Pulkanteil) ²
	43,3	1873,5	34,7	1203,7	73,8
	40,3	1621,3	40,9	1670,2	0,4
	30,8	946,7	32,3	1045,9	2,5
	32,5	1056,3	37,5	1402,9	24,6
	34,3	1176,3	38,9	1515,8	21,5
	33,2	1103,7	27,0	731,7	38,1
	22,7	516,5	26,4	695,2	13,3
	33,8	1145,2	29,3	859,1	20,5
	26,0	677,7	25,7	658,2	0,1
	27,9	776,2	30,2	913,1	5,6
	26,1	678,7	28,6	816,4	6,4
	25,7	660,8	27,1	732,3	1,8
Anzahl	56				
Mittelwert	27,1	828,0	27,2	780,6	43,3
s	9,7	504,1	6,3	358,7	68,0

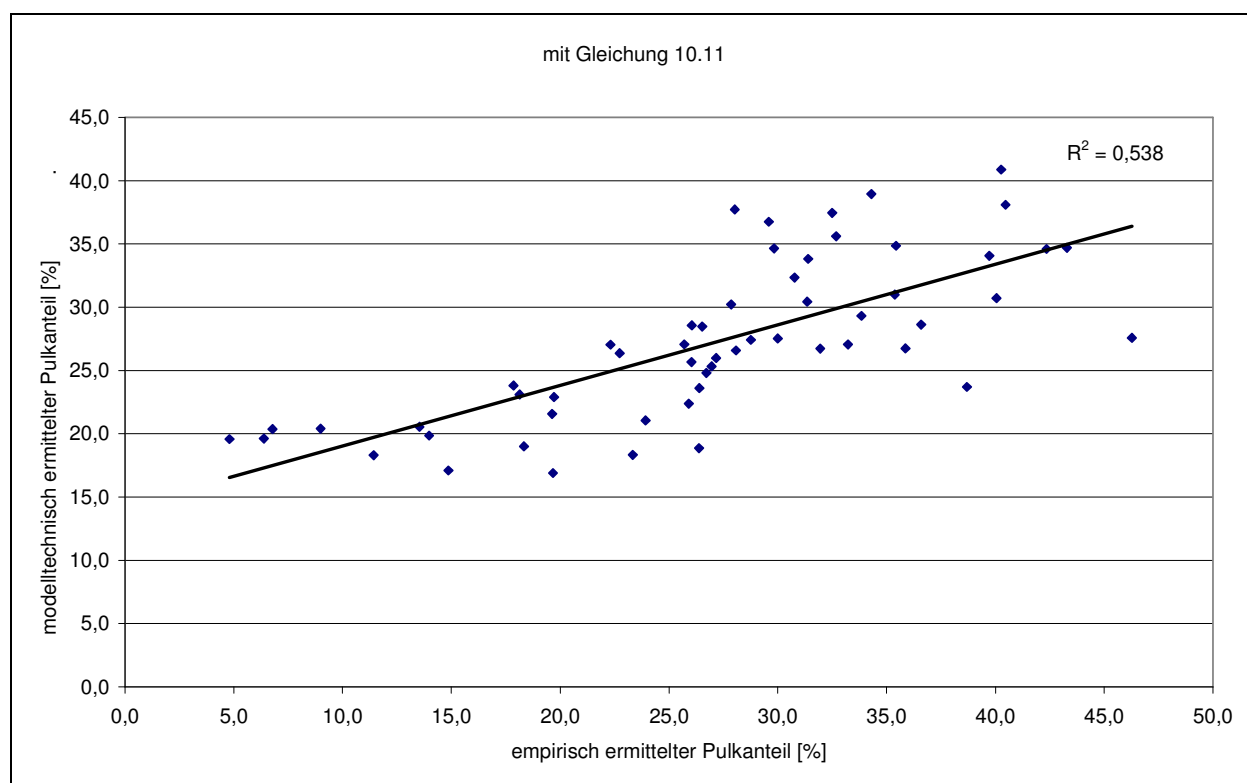


Bild A 6.1: Erforderliches Bestimmtheitsmaß R^2 zur Berechnung des Kovarianzanteils U^c (mit Gleichung 10.11)

A 6.2 Schätzung Pulkanteil mit Gleichung 10.13 und 10.14

	Empirie		Modell		Vergleich
	Pulkanteil	Pulkanteil ²	Pulkanteil	Pulkanteil ²	(Diff. Pulkanteil) ²
	13,5	183,2	19,0	362,6	30,3
	6,4	40,7	18,9	358,4	157,4
	14,0	195,4	21,0	439,6	48,8
	4,8	23,1	22,6	511,5	317,3
	6,8	46,0	20,9	436,5	199,2
	9,0	80,8	20,8	434,1	140,3
	23,3	544,4	20,0	399,8	11,1
	14,9	221,0	18,0	325,6	10,1
	11,4	130,6	12,6	158,6	1,4
	18,3	336,1	13,9	192,0	20,0
	19,7	387,0	12,7	161,5	48,5
	26,4	697,0	22,1	489,2	18,3
	18,1	329,0	22,4	503,7	18,5
	19,6	385,4	20,1	402,6	0,2
	38,7	1497,2	22,5	505,9	262,5
	19,7	388,8	22,7	515,7	9,0
	17,9	318,9	24,6	604,0	45,1
	25,9	671,2	21,7	470,3	17,8
	23,9	572,3	21,7	471,5	4,9
	26,4	695,9	18,7	350,6	58,6
	46,3	2140,8	31,2	974,6	226,5
	36,6	1339,1	31,1	965,5	30,5
	40,1	1604,1	33,8	1145,8	38,5
	35,4	1251,6	34,7	1205,9	0,4
	31,4	983,1	34,5	1189,0	9,8
	26,5	703,9	33,1	1095,5	43,1
	28,1	788,5	31,3	979,6	10,4
	27,0	726,8	30,0	899,3	9,2
	35,9	1286,6	29,5	871,9	40,2
	29,8	889,5	37,4	1397,2	57,1
	22,3	497,8	29,8	890,4	56,7
	30,0	900,0	29,0	839,8	1,0
	26,7	713,7	25,9	668,9	0,7
	27,2	738,2	25,9	671,9	1,6
	32,0	1020,8	25,4	644,3	43,1
	28,8	827,5	29,1	846,1	0,1
	42,3	1793,4	35,0	1227,9	53,4
	32,7	1068,0	35,0	1227,0	5,5
	29,6	875,7	38,2	1458,2	73,9
	28,0	785,2	36,7	1348,5	75,7
	35,4	1255,7	35,0	1225,6	0,2
	31,4	986,0	35,1	1228,8	13,4
	40,5	1637,6	28,5	811,2	143,7
	39,7	1577,6	28,8	830,9	118,7
	43,3	1873,5	27,8	772,7	239,8
	40,3	1621,3	30,3	920,1	98,7
	30,8	946,7	28,2	794,7	6,7
- Fortsetzung nächste Seite -					

	Empirie		Modell		Vergleich
	Pulkanteil	Pulkanteil ²	Pulkanteil	Pulkanteil ²	(Diff. Pulkanteil) ²
	32,5	1056,3	28,7	824,7	14,3
	34,3	1176,3	29,7	879,9	21,5
	33,2	1103,7	28,8	828,2	19,7
	22,7	516,5	27,4	750,2	21,7
	33,8	1145,2	30,4	926,7	11,6
	26,0	677,7	28,8	826,8	7,4
	27,9	776,2	32,9	1080,1	25,0
	26,1	678,7	31,7	1007,3	32,3
	25,7	660,8	30,4	926,1	22,3
Anzahl	56				
Mittelwert	27,1	828,0	27,1	772,8	53,5
s	9,7	504,1	6,4	332,1	72,9

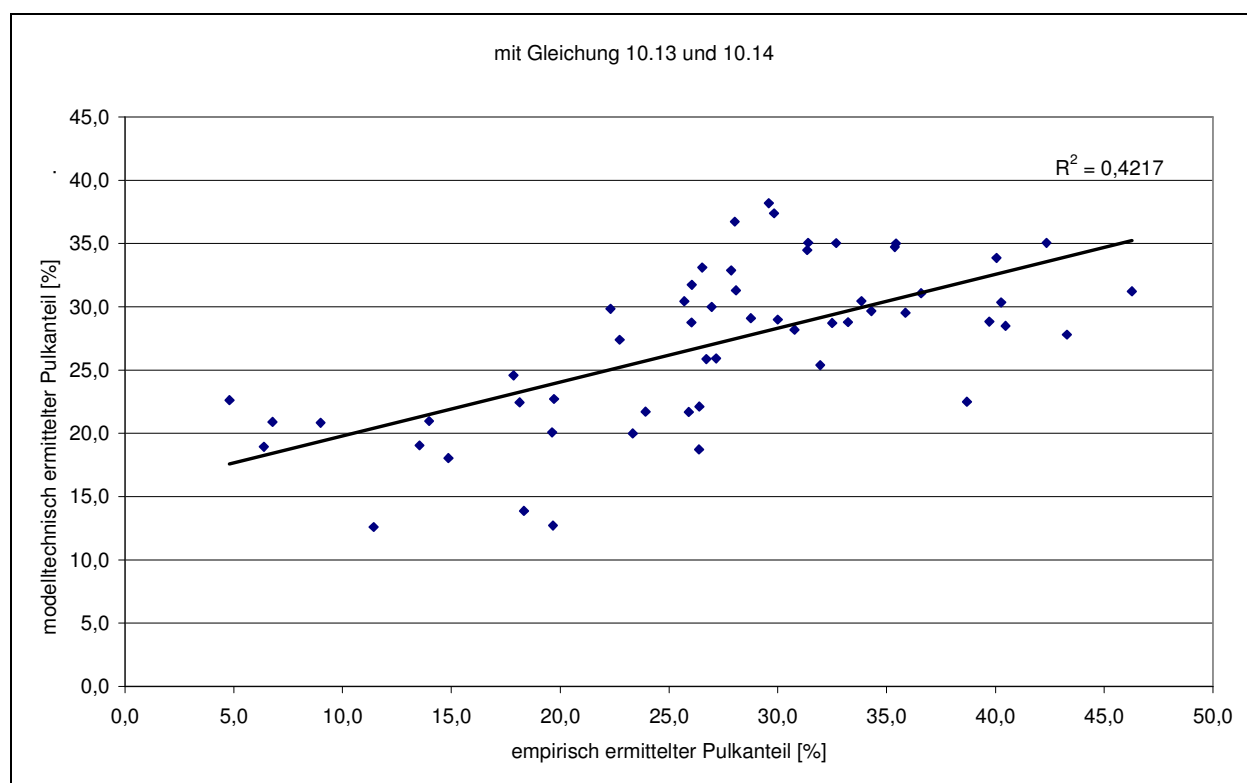


Bild A 6.2: Erforderliches Bestimmtheitsmaß R^2 zur Berechnung des Kovarianzanteils U^C (mit Gleichung 10.13 und 10.14)

A 7 Ausreißertest von WALSH

Gemäß der Verfahrensvorschrift des WALSH -Tests (in HÜFTLE, 2007) ist bei der vorliegenden Stichprobe ($n = 57$) eine minimale Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,1 + 1 \cdot 10^{-17}$ zulässig. Ein geringeres α führt aufgrund der unter 5. aufgeführten Gleichung zu einem ungültigen Wert.⁴ Für die Festlegung des Signifikanzniveaus sind die Ausführungen zu den statistischen Tests im Rahmen der Analyse der Geschwindigkeiten (vgl. v.a. A 3.2, Punkt 7) entsprechend zu beachten.

Unter der Prämisse, dass der „schwerwiegendste Fehler“ darin bestünde, einen Ausreißer fälschlicherweise in der Stichprobe zu belassen (fälschliche Annahme der Nullhypothese = Fehler 2. Art, vgl. Ziffer 6.6.4), soll das β -Risiko minimiert werden. Hierbei wird in Kauf genommen, dass umgekehrt das α -Risiko steigt. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass das Risiko einen Wert fälschlicherweise als Ausreißer zu bezeichnen relativ groß ist. Für den durchzuführenden WALSH -Test wird daher eine relativ hohe Irrtumswahrscheinlichkeit von 20 % für die Annahme bzw. das Verwerfen der Nullhypothese zugelassen.

Zur Durchführung des Tests sind folgende Schritte erforderlich:

1. Sortieren des Datensatzes in aufsteigender Reihenfolge x_1, x_2, \dots, x_n .
2. Festlegen einer Anzahl $r \geq 1$ möglicher Ausreißer.
3. $c = [\sqrt{2n}]$, wobei $[]$ die Rundung zur nächst größeren ganzen Zahl bezeichnet⁵
4. $k = r + c$

$$5. \quad a = \frac{1 + b \sqrt{\frac{c - b^2}{c - 1}}}{c - b^2 - 1} \quad \text{mit } b^2 = 1/\alpha$$

- Hypothesentest für die r kleinsten Punkte: Die Nullhypothese ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von α zu verwerfen, falls $X_r - (1+a)X_{r+1} + aX_k < 0$ gilt.
- Hypothesentest für die r größten Punkte: Die Nullhypothese ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von α zu verwerfen, falls $X_{n+1-r} - (1+a)X_{n-r} + aX_{n+1-k} > 0$ gilt.

Falls beide Ungleichungen erfüllt sind, sind sowohl die kleinen als auch die großen Werte als Ausreißer anzusehen.

Rang	Pulklänge _{85%} [Kfz]
1	2,0
...	...
39	4,3
40	5,0
...	...
47	5,0
48	5,0
49	5,5
50	6,0
...	...
55	6,0
56	6,1
57	8,8

n	57
Max	8,8
r	1
Alpha	0,2
c	11
k	12
a	0,55
n-r	56
x(n-r)	6,1
n+1-k	46
x(n+1-k)	5
Prüfgröße	0,3

⁴ Ein Signifikanzniveau von exakt $\alpha = 0,1$ erfordert eine Stichprobe von $n > 60$.

⁵ Beispiel: $3,2 \rightarrow 4$

A 8 Vergleich zwischen Empirie und modelltechnisch ermittelter 85 %-igen Pulklänge auf Vorlaufstrecken innerhalb von 2+1-Strecken mittels des Theil'sche Ungleichheitskoeffizienten U

	Empirie		Modell		Vergleich
	Pulkanteil	Pulkanteil ²	Pulkanteil	Pulkanteil ²	(Diff. Pulkanteil) ²
	3,0	9,0	3,3	10,6	0,1
	2,3	5,1	3,2	10,6	1,0
	4,3	18,5	3,3	11,2	0,9
	3,6	12,6	3,4	11,8	0,0
	3,5	12,3	3,3	11,2	0,0
	3,1	9,6	3,3	11,2	0,1
	3,2	9,9	3,3	10,9	0,0
	2,2	4,8	3,2	10,3	1,0
	3,0	9,0	3,0	9,2	0,0
	3,0	9,0	3,1	9,4	0,0
	2,0	4,0	3,0	9,2	1,1
	3,7	13,3	3,4	11,6	0,1
	4,0	16,0	3,4	11,8	0,3
	5,0	25,0	3,4	11,8	2,5
	4,0	16,0	3,4	11,9	0,3
	3,6	13,0	3,6	12,7	0,0
	5,5	29,7	3,4	11,5	4,3
	4,0	16,0	3,4	11,5	0,4
	3,0	9,0	3,2	10,5	0,1
	5,0	25,0	4,2	17,8	0,6
	5,0	25,0	4,2	17,7	0,6
	6,0	36,0	4,6	21,4	1,9
	5,0	25,0	4,8	23,0	0,0
	6,0	36,0	4,7	22,5	1,6
	3,4	11,6	4,5	20,3	1,2
	4,0	16,0	4,2	17,9	0,1
	4,0	16,0	4,1	16,6	0,0
	6,0	35,4	4,0	16,1	3,7
	6,0	36,0	5,4	29,1	0,4
	4,2	17,6	4,1	16,4	0,0
	4,0	16,0	4,0	15,6	0,0
	5,0	25,0	3,7	13,4	1,8
	4,1	16,8	3,7	13,5	0,2
	4,0	16,0	3,6	13,2	0,1
	4,0	16,0	4,0	15,7	0,0
	4,0	16,0	4,9	23,6	0,7
	6,0	36,0	4,9	23,5	1,3
	6,1	37,2	5,6	31,6	0,2
	5,0	25,0	5,2	27,3	0,1
	5,0	25,0	4,8	23,5	0,0
	6,0	36,0	4,9	23,6	1,3
	4,0	16,0	3,9	15,2	0,0
	4,0	16,0	3,9	15,5	0,0
	5,0	25,0	3,8	14,7	1,4
- Fortsetzung nächste Seite -					

	Empirie		Modell		Vergleich
	Pulkanteil	Pulkanteil ²	Pulkanteil	Pulkanteil ²	(Diff. Pulkanteil) ²
	3,0	9,0	4,1	16,9	1,2
	3,0	9,0	3,9	15,0	0,8
	3,0	9,0	3,9	15,4	0,9
	3,0	9,0	4,0	16,2	1,1
	3,0	9,0	3,9	15,5	0,9
	2,0	4,0	3,8	14,4	3,2
	5,0	25,0	4,1	17,0	0,8
	3,2	9,9	3,9	15,5	0,6
	3,0	9,0	4,5	19,9	2,1
	3,3	10,6	4,3	18,4	1,1
	3,5	11,9	4,1	17,0	0,5
	3,0	9,0	4,6	20,8	2,4
Anzahl	56				
Mittelwert	4,0	17,3	4,0	16,1	0,8
s	1,1	9,5	0,6	5,2	1,0

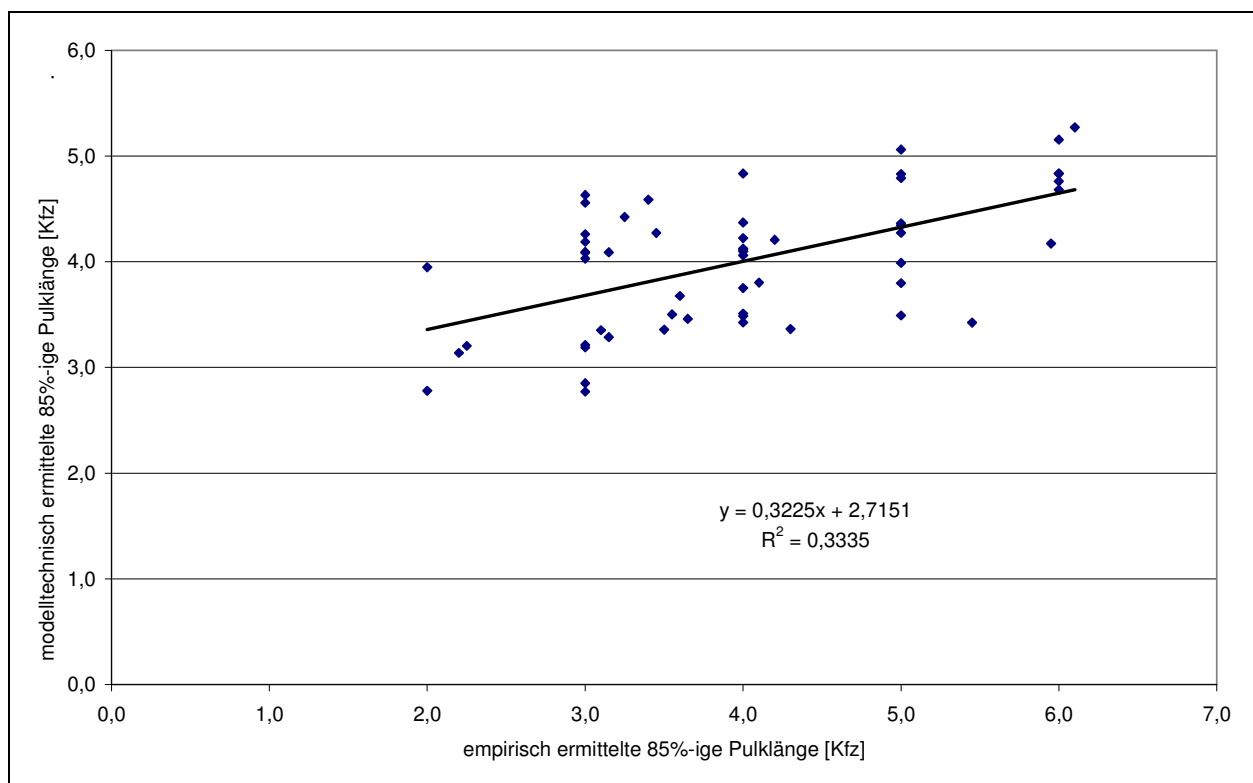


Bild A 8.1: Erforderliches Bestimmtheitsmaß R^2 zur Berechnung des Kovarianzanteils U^c

A 9 (Bereinigte) Datenbasis zur Bestimmung des PulkaufLösungswegs

Untersuchungsstrecke	Pulklänge [Fz]	PulkaufLösung _{85%} [m]	Anzahl [Pulks]
1	1	350	13
4	1	325	20
7	1	285	25
8	1	460	5
9	1	399	48
10	1	445	15
11	1	448	10
12	1	318	15
13	1	250	46
14	1	300	15
15	1	295	25
1	2	408	20
4	2	350	24
7	2	325	16
8	2	530	9
9	2	595	17
10	2	543	22
11	2	526	12
12	2	458	20
14	2	400	16
15	2	450	21
1	3	519	16
4	3	475	12
8	3	750	15
10	3	760	13
11	3	600	15
12	3	635	25
13	3	425	36
14	3	600	21
1	4	563	11
8	4	795	15
11	4	709	18
12	4	850	22
13	4	685	25
14	4	710	13
1	5	825	6
4	5	594	6
7	5	601	14
8	5	889	10
10	5	790	9
11	5	859	12
12	5	864	22
14	5	868	4
15	5	769	6
1	6	900	6
4	6	600	4
7	6	727	10
9	6	915	9
10	6	835	3
11	6	975	6
12	6	875	15
13	6	774	8
14	6	960	9
15	6	784	12